

**FOSFORILANNOITUKSEN VAIKUTUS KERÄKAALIN (*BRASSICA OLERACEA* L.
CAPITATA-RYHMÄ) SATOON, FOSFORIN OTTOON JA FOSFORIN
PELTOTASEESEEN**

Aava Asikainen
Maisterintutkielma
Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden laitos
Puutarhatiede
Joulukuu 2019



| | | |
|--|-----------------|-------------------------------------|
| Tiedekunta/Osasto Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta | | Laitos Maataloustieteiden laitos |
| Tekijä Aava Asikainen | | |
| Työn nimi Fosforilannoituksen vaikutus keräkaalin (<i>Brassica oleracea</i> L. Capitata-Ryhmä) satoon, fosforinottoon ja fosforin peltotaseeseen | | |
| Oppiaine Kasvintuotantotieteet | | |
| Työn laji Maisterintutkielma | Aika 12/2019 | Sivumäärä 46 s. |
| <p>Tiivistelmä</p> <p>Keräkaalin fosforilannoitusta on tutkittu vähän, vaikka kaali on tärkeä avomaavihannes Suomessa. Kaalille suositellut lannoitemäärät ovat verrattain suuria, ja liiallinen lannoitus lisää ravinteiden huuhtoumariskiä. Tarvitaan tieteellistä tutkimusta, jotta voidaan selvittää, millaisella lannoitustasolla varmistetaan hyvä sato vähentäen samalla ympäristöriskejä.</p> <p>Tässä tutkielmassa tutkittiin fosforilannoituksen vaikutusta keräkaalin satoon, fosforipitoisuuteen, fosforinottoon ja fosforin peltotaseeseen. Piikkiössä järjestettiin kaksi koetta fosforin suhteen viljavuudeltaan erilaisilla peltolohkoilla. Korkean P-viljavuusluokan kokeessa oli neljä lannoitustasoa välillä 0-32 kg P ha⁻¹ ja välttävän P-luokan kokeessa neljä käsittelyä välillä 0-100 kg P ha⁻¹ sekä lisäksi starttilannoitekäsittely.</p> <p>Käsittelyllä ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta satoon, kasvinäytteiden fosforipitoisuuksiin tai fosforinottoon. Sato oli korkean P-luokan kokeessa 83-87 t ha⁻¹ ja välttävän P-luokan kokeessa 66-69 t ha⁻¹. Kasvusto otti fosforia korkean P-luokan kokeessa 50 kg ha⁻¹ ja peltotase oli kaikilla lannoitustasoilla alijäämäinen. Välttävän P-luokan kokeessa fosforinotto oli 40-45 kg ha⁻¹ ja peltotase ylijäämäinen lannoitustasosta 30 kg P ha⁻¹ lähtien.</p> <p>On todennäköistä, että keräkaalille riittää ympäristökorvauksen lannoitusrajoja vähäisempi fosforilannoitus. Kaalille voidaan suositella lannoitustasoa, jolla korvataan sadon mukana poistunut fosfori.</p> | | |
| Avainsanat – Nyckelord – Keywords keräkaali, lannoitus, fosfori, fosforilannoitus, ravinnepitoisuus, ravinnonotto, ravinnetase | | |
| Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Maataloustieteiden laitos ja Viikin kampuskirjasto | | |
| Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information Työtä ohjasivat MMT Terhi Suojala-Ahlfors (Luonnonvarakeskus) ja dosentti Pauliina Palonen (Helsingin yliopisto) | | |



| | | | |
|---|---------------------------|---|--|
| Faculty Faculty of Agriculture and Forestry | | Department Department of Agricultural Sciences | |
| Author Aava Asikainen | | | |
| Title The effect of phosphorus fertilization on yield, phosphorus uptake and phosphorus balance of white cabbage (<i>Brassica oleracea</i> L. Capitata Group) | | | |
| Subject Plant Production Sciences | | | |
| Level Master's thesis | Month and year 12/2019 | Number of pages 46 pp. | |
| <p>Abstract</p> <p>Research on phosphorus (P) fertilization of white cabbage has been limited even though white cabbage is an important field vegetable in Finland. The quantities of phosphorus recommended in Finland when cultivating white cabbage are relatively large and excessive fertilization increases the risk of runoff to water systems. Scientific research is needed to determine fertilization levels that ensure good yields while reducing risks to the environment.</p> <p>The effects of P fertilization on yield, phosphorus uptake and phosphorus balance of white cabbage were studied in two soils of different P status in Piikkiö, Finland. The experiment on soil with loamy sand texture and high P status consisted of four fertilization treatments between 0-32 kg P ha⁻¹ while the experiment on clay parcel with relatively low P status consisted of five treatments between 0-100 kg P ha⁻¹, including a starter treatment.</p> <p>Yield, plant P content and P uptake were unaffected by the treatments. Yield was 83-87 t ha⁻¹ on high P soil and 66-69 t ha⁻¹ on low P soil. In high P soil, uptake of P by the plants was 50 kg ha⁻¹ and field P balance was negative in all treatments. In low P soil, uptake was 40-45 kg ha⁻¹ and P balance was positive starting from treatment level 30 kg P ha⁻¹.</p> <p>It is likely that P fertilization levels based on the maximum limits set by the national Agri-environmental Programme are unnecessarily high for white cabbage. A level of fertilization equaling the P uptake of the yield can be recommended.</p> | | | |
| Avainsanat – Nyckelord – Keywords Brassica oleracea capitata, fertilization, phosphorus, phosphate treatment, nutrient uptake, nutrient balance | | | |
| Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Department of Agricultural Sciences and Viikki campus library | | | |
| Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information Supervisors: Ph.D. (Hortic.) Terhi Suojala-Ahlfors (Natural Resources Institute Finland), university lecturer Pauliina Palonen (University of Helsinki) | | | |

SISÄLLYS

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 5 |
| 2 | FOSFORI | 6 |
| 2.1 | Fosfori kasvinravinteena | 6 |
| 2.2 | Viljavuusanalyysi ja peltotase | 9 |
| 2.3 | Fosforilannoituksen satovaste ja fosforin käytön tehokkuus..... | 10 |
| 2.4 | Fosforilannoituksen ympäristövaikutukset..... | 11 |
| 3 | KERÄKAALI | 12 |
| 3.1 | Keräkaali viljelykasvina | 12 |
| 3.2 | Keräkaalin lannoitus | 14 |
| 4 | TUTKIMUKSEN TAVOITTEET..... | 16 |
| 5 | AINEISTO JA MENETELMÄT..... | 16 |
| 5.1 | Kasviaineisto ja ympäristötekijät | 16 |
| 5.2 | Käsittelyt | 18 |
| 5.3 | Koeasetelma..... | 20 |
| 5.4 | Kokeiden hoito | 21 |
| 5.5 | Mittaukset ja analyysit | 22 |
| 6 | TULOKSET | 25 |
| 7 | TULOSTEN TARKASTELU | 31 |
| 7.1 | Sato ja peltotase | 31 |
| 7.2 | Maaperä ja juuristo | 34 |
| 8 | JOHTOPÄÄTÖKSET..... | 36 |
| 9 | KIITOKSET | 37 |
| | LÄHTEET | 37 |
| | LIITE 1: KOEALUEEN SIJAINTI..... | 44 |
| | LIITE 2: KORKEAN P-VILJAVUUSLUOKAN KOKEEN KARTTA JA KOERUUTU | 45 |
| | LIITE 3: VÄLTTÄVÄN P-VILJAVUUSLUOKAN KOKEEN KARTTA JA KOERUUTU..... | 46 |

1 JOHDANTO

Fosforilannoitteiden käyttö maataloudessa on vähentynyt huomattavasti viime vuosikymmeninä, mutta tarvittavat lannoitusmäärät kaipaavat edelleen tarkennusta etenkin puutarhakasvien osalta. Keräkaali (*Brassica oleracea* L. Capitata-Ryhmä) on Suomessa yleisesti viljelty avomaanvihannes, mutta sen fosforilannoituksesta Suomessa on saatavilla niukasti tutkimustietoa. Ulkomaiset tutkimustulokset eivät ole sellaisenaan sovellettavissa meillä, koska eri maissa käytetään erilaisia maan fosforipitoisuuden mittaamenetelmiä. Suomessa keräkaalille suositellaan usein annettavaksi suurin ympäristökorvausjärjestelmän sallima lannoitemäärä, joka on huomattavasti suurempi kuin muiden Pohjois-Euroopan maiden suositukset.

Viljelykasvien vähäinen lannoitus voi johtaa pieneen satoon ja sadon laadun heikkene-miseen. Toisaalta kasvin tarvetta ja maan sitomiskykyä suurempi lannoitus lisää ravin-nehuhtouman ja vesistöjen rehevöitymisen riskiä. Fosfori- ja typpivalumat ovat yksi suurimpia maapallon ekologista kantokykyä uhkaavia tekijöitä. Itämeri ja Suomen sisä-vedet ovat alttiita typen ja fosforin aiheuttamalle rehevöitymiselle. Maatalous aiheuttaa Suomessa 60 % ihmistoiminnan seurauksena syntyvästä Itämeren fosforikuormasta. Tarpeettoman suuri fosforilannoitus aiheuttaa lisäksi viljelijälle turhia kuluja. Myös väki-lannoitefosforin saatavuuden heikkeneminen lisää tarvetta rajoittaa fosforinkäyttöä.

Tämä tutkimus oli osa Luonnonvarakeskuksen hanketta Vihannesten ja marjakasvien ta-sapainoinen N- ja P-lannoitus ja ravinnepäästöjen vähentäminen, joka toteutettiin Terhi Suojala-Ahlforsin johdolla vuosina 2014-2017. Hankkeen rahoittivat Maa- ja metsäta-lousministeriön Maatilatalouden kehittämisrahasto Makera ja Yara Suomi Oy. Hankkeen tavoitteina oli määrittää tärkeimpien vihanneslajien ja mansikan satovaste fosforilan-noitukseen, arvioida fosforilannoituksen taloudellista optimia ja vihannesten hyvään sa-toon ja laatuun tarvittavaa typpilannoitusmäärää ja -ajoitusta sekä arvioida ympäristö-ohjelman lannoitusrajoja sadontuoton ja ravinnekuormituksen kannalta. Tämän tutki-muksen avulla pyrittiin lisäämään tietoa, jonka perusteella arvioidaan keräkaalin fosfo-rilannoitustarvetta. Sopivalla lannoitustasolla varmistetaan hyvä sato pienentäen sa-malla ympäristöriskejä.

2 FOSFORI

Fosforin (P) kierto maapallolla on hidasta verrattuna hiileen ja typpeen (Smil 2000). Fosfori ei muodosta pysyviä kaasuyhdisteitä, joten ilmakehä ei ole oleellinen osa fosforin kiertoa eikä se toimi kasvihuonekaasuna (Smil 2000). Hidas maailmanlaajuinen fosforikierto vaikuttaa ihmiskunnan historian mittakaavassa yksisuuntaiselta virtaukselta maalta meren sedimentteihin, koska paluu sedimenteistä perustuu hitaisiin maankuoren liikkeisiin. Samaan aikaan toimii nopeampi kierto, jossa maaperän fosfori siirtyy kasveihin ja palaa maaperään hajoavan biomassan mineralisoituessa (Smil 2000). Tämä kierto on luonnossa hyvin tehokas, ja sen hävikki korvautuu vain maaperän hitaasta rapautumisesta vapautuvalla fosforilla.

Lannoitefosfori saadaan louhimalla fosfaattikiveä, joka on uusiutumaton luonnonvara (Hawkesford ym. 2012). Ihmiselle käytännössä saavutettavissa olevat fosfaattikivivarat ovat keskittyneet muutamien valtioiden alueelle. Maapallon fosfaattikivestä 71 % on Marokossa ja Länsi-Saharassa, ja lisäksi sitä on muun muassa Kiinassa, Algeriassa ja Syyriassa (Jasinski 2019). Arviot fosfaattikiven riittävydestä vaihtelevat muutamasta vuosikymmenestä muutamaankin vuosisataan (Cordell ja White 2011). Ajan myötä maapallon fosforilähteiden laatu ja saavutettavuus laskevat ja fosforilannoitteiden tuotanto muuttuu yhä kalliimmaksi. Viljelykasvien fosforinlähteenä voidaan käyttää väkilannoitteiden sijasta esimerkiksi kotieläinlainta. Suomessa syntyvän lannan fosfori riittäisi korvaamaan väkilannoitteet kokonaan, mutta lannan kuljetus sen syntypaikalta käyttöpaikalle ei ole taloudellisesti kannattavaa (Ylivainio ym. 2014).

2.1 Fosfori kasvinravinteena

Fosfori on kasveille välttämätön, pääravinteisiin luettava kasvinravinne. Fosforia pidetään typen ohella tyypillisimpänä kasvin kasvua rajoittavana ravinteena (Weih ym. 2018). Maan fosforivarat voidaan jakaa saatavuuden perusteella kolmeen ryhmään: stabiiliin pooliin, labiiliin pooliin ja maanesteen fosforiin (Mengel ja Kirkby 2001). Yli

90 % maan fosforin kokonaismäärästä on kasveille käyttökelvottomassa stabiilissa muodossa, sitoutuneena esimerkiksi kalsium-, rauta- ja alumiiniyhdisteisiin sekä humukseen. Labiiliksi pooliksi kutsutaan sitä osaa liukenemattomasta fosforista, joka on kasveille käyttökelpoista usean kasvukauden mittakaavassa. Tällaisia ovat esimerkiksi maahiukkasten pinnoille kiinnittyneet fosfaatit. Hienojakoiset maalajitteet, kuten savi, pidättävät enemmän ravinteita kuin karkeat.

Vain murto-osa maan fosforista on maanesteeseen liuenneena, kasveille heti saatavilla. Maanesteen tärkeimmät epäorgaaniset ionit ovat ortofosfaatit H_2PO_4^- ja HPO_4^{2-} , joiden määräsuhte riippuu maan pH:sta (Mengel ja Kirkby 2001). Labiilin poolin ja maanesteen poolin välillä on herkkä tasapaino. Kasvien ottaessa maanesteen fosforia se korvautuu maahan sitoutuneella labiilin poolin fosforilla, ja toisaalta maanesteen fosforipitoisuuden kasvaessa fosforia sitoutuu maaperään (Mengel ja Kirkby 2001, Ehlert ym. 2003). Fosfori sitoutuu maahan sitä tiukemmin, mitä matalampi maan pH on (Mengel ja Kirkby 2001). Lannoitus on kasvattanut Suomen peltomaiden kasveille käyttökelpoisia fosforivaroja (Uusitalo ym. 2007b).

Fosforin otto kasviin on aktiivista ja se tapahtuu pääasiassa H_2PO_4^- -ioneina (Mengel ja Kirkby 2001, Hawkesford ym. 2012). Kasvien juuret pystyvät ottamaan fosforia myös maanesteen fosfaattipitoisuuden ollessa hyvin pieni, vaikka pitoisuus juuren sisällä voi olla tuhatkertainen (Mengel ja Kirkby 2001). Fosforin liikkuminen maassa on vähäistä, joten kasvien tulee kasvattaa juurensa fosforivarojen luo (Mengel ja Kirkby 2001). Fosforin saatavuuteen kasveille vaikuttavat paitsi maaperässä olevan fosforin määrä, myös maaperän laatu: pH, orgaanisen aineksen määrä, kosteus ja rakenne sekä maan mikrobisto (Schröder ym. 2011). Biologiset prosessit kuten orgaanisen fosforin mineralisaatio kasveille käyttökelpoiseen epäorgaaniseen muotoon ja mikrobien aikaansaama ortofosfaatin immobilisaatio vaikuttavat merkittävästi fosforin saatavuuteen (Bünemann ym. 2012, Bünemann 2015). Labiilin epäorgaanisen fosforin pitoisuuden ollessa pieni maan mikrobisto ottaa fosforia nopeammin kuin silloin, kun fosforia on runsaasti saatavilla (Bünemann ym. 2012).

Kasvien fosforin saantia parantavat juuriston keskittäminen lähellä maanpintaa, jossa suurin osa ravinteista sijaitsee, kasvun keskittäminen juuriin maanpäällisten osien sijaan (juuri-verso-suhde), juurten nopea uusiutuminen, juurten pituus, juurikarvojen määrä ja pituus, sienijuuri ja kasvin aiheuttamat ritsosfääriin muutokset (Lambers ym. 2006). Maan kosteus lisää ravinteiden liikkuvuutta, ja kasvi voi parantaa kuivassa pintamaassa olevan fosforin liikkuvuutta siirtämällä siihen juuriensa kautta vettä maan kosteista osista (Lambers ym. 2006). Lisäksi juuret voivat erittää orgaanisia yhdisteitä, jotka irrottavat fosfaattia maahiukkasista, esimerkiksi fosfataasia (Nannipieri ym. 2011). Myös perimä ja viljelytekniikka vaikuttavat kasvien fosforin saantiin (Schneider ym. 2019).

Fosfori on kasvissa helposti liikkuva aine, joka voi liikkua sekä ksyleemissä latvaa kohti että nilassa juuria kohti (Mengel ja Kirkby 2001). Tarvittaessa kasvi voi siirtää fosforia vanhoista lehdistä nuoriin (Jeschke ym. 1997). Nilassa versosta juuriin kulkevan fosforin pitoisuus toimii version fosforintarpeesta kertovana signaalina, jonka perusteella juuret säätelevät fosforin ottoa (Marschner ym. 1997). Kasvin sisällä fosfaatti joko säilyy epäorgaanisessa muodossa tai se muutetaan fosfaattiesteriksi tai liitetään pyrofosfaattisidoksella toiseen fosfaattiin (Hawkesford ym. 2012). Muutos epäorgaanisesta orgaaniseksi yhdisteeksi ja takaisin on nopea.

Fosfori toimii rakenneosana muun muassa kasvien membraanien fosfolipideissä ja nukleiinihappojen (DNA, RNA) nukleotideissä (Hawkesford ym. 2012). Yhteyttämisessä energia sitoutuu fosforiyhdiste ATP:n pyrofosfaattisidokseen, ja tämän sidoksen hydrolyysissä vapautuva energia voidaan käyttää kasvin muiden aineiden fosforylaatioon (Hawkesford ym. 2012). Fosfori on fosforylaation myötä mukana lähes kaikissa kasvin reaktioissa. Fosforin puute ilmenee kasvin pienikokoisuutena, heikkona versomisena ja tummina tai punertavina lehtinä (Mengel ja Kirkby 2001). Puute ei kuitenkaan yleensä juurikaan haittaa juurten kasvua, sillä fosforin puutteessa kasvi siirtää fosforia juuriin (Fredeen ym. 1989, Jeschke ym. 1997).

2.2 Viljavuusanalyysi ja peltotase

Viljavuusanalyysissä määritetään peltolohkon viljelyominaisuudet ja ravinteiden pitoisuudet. Analyysissä käytetään yleensä muokkauserroksesta otettua maanäytettä. Näytteestä määritetään maalaji, multavuus, happamuus, johtoluku ja erilaisin uutto- ja määritysmenetelmin ravinnemäärät. Tuloksia tulkitaan vertaamalla niitä laajoista kenttäkokeista kerättyihin tietoihin ja niiden perusteella voidaan tehdä arvio lannoituksen vaikutuksesta sadon määrään eli määrittää peltolohkon viljavuusluokka.

Suomessa peltomaan fosforipitoisuuden mittauksessa on käytetty vuosikymmenten ajan Vuorisen ja Mäkitien (1955) menetelmää, joka perustuu ammoniumasetaatti-uuttoon ja ammoniummolybdaatti -kompleksin spektrofotometriseen mittaukseen. Menetelmässä uuttoon käytetään 0,5 M ammoniumasetaattia ja 0,5 M etikkahappoa (pH 4,65) maa-liuos-suhteella 1:10. Koska menetelmällä määritetään vain helppoliukoisessa muodossa olevan fosforin pitoisuus, tulos ei kerro maan kokonaisfosforimäärää eikä kasveille käyttökelpoisen fosforin kokonaismäärää, vaan toimii indikaattorilukuna, jonka perusteella voidaan arvioida fosforilannoitustarvetta (Lemola ym. 2018).

Peltomaan keskimääräinen fosforipitoisuus Suomessa oli Eurofins Agron tilastojen (2019b) mukaan 12,29 mg l⁻¹ vuosina 2006-2010. Maan fosforipitoisuudet ovat suuria etenkin erikoiskasvi- ja eläintuotantoon käytettävillä mailla (Uusitalo ym. 2007b). Suuret fosforipitoisuudet ovat yleisiä Lounais-Suomessa, jossa on paljon sika- ja siipikarjatiloja sekä erikoiskasvinviljelyä (Uusitalo ym. 2007b). Erikoiskasvien viljelyssä lannoitusmäärät ovat suurempia, taseet ylijäämäisempiä ja sitä myötä maan fosforipitoisuudet korkeampia kuin viljantuotannossa (Aakkula ym. 2010). Pitoisuudet ovat korkeita etenkin pitkään erikoisviljelyssä olleilla peltolohkoilla. Viljojen on todettu sopivan erikoiskasvien viljelykiertoon vähentämään fosforin kertymistä (Hannukkala ym. 2014). Samalla ne vähentävät tuhoojariskiä ja parantavat maan rakennetta.

Peltotase on viljelijän pellolle lisäämän ja sieltä poistuvan ravinnemäärän erotus. Jos peltotase on positiivinen, ravinnetta kertyy maahan tai poistuu hävikkien myötä. Jos tase on negatiivinen, kasvit ovat käyttäneet lisättyjen ravinteiden lisäksi maan ravinnevaroja

kasvukauden aikana. Taselaskelmien avulla voidaan arvioida ravinnepanosten määrää talouden ja ympäristön kannalta. Peltotaselaskelmien suurimpia haasteita on, että kasvi voi tuottaa saman sadon eri ravinnepitoisuuksilla ja sadon ravinnepitoisuus voi vaihdella huomattavasti (Salo 2003).

Fosforilannoitteiden käyttö Suomessa on vähentynyt huomattavasti viime vuosikymmenten aikana. Fosforin keskimääräinen peltotase oli vuonna 1985 29,0 kg ha⁻¹ ja vuonna 2017 5,8 kg ha⁻¹ (Luken tilastopalvelut 2019a). Lannoitustasojen pienentymisestä huolimatta peltoihin lisätään lannoituksen mukana edelleen keskimäärin enemmän fosforia kuin sieltä sadon mukana poistuu.

2.3 Fosforilannoituksen satovaste ja fosforin käytön tehokkuus

Fosforilannoituksella saadaan sadonlisää, jos maan fosforipitoisuus on alhainen, etenkin eloperäisillä mailla, joilla kasveille käyttökelpoisen fosforin varanto on pieni (Valkama ym. 2011). Käytännössä esimerkiksi savimaalla sadonlisä on usein eloperäisiä maita vähäisempi, koska savimaalla on suuri fosforinpidätyskyky ja siten tyypillisesti suuri käyttökelpoisen fosforin varanto. Ankaruutta fosforin puute voi aiheuttaa sadon määrän ja laadun heikkenemistä, mutta toisaalta kasvien fosforipitoisuus voi vaihdella sadon kärsimättä.

Maan fosforipitoisuuden kasvaessa fosforilannoituksen satovaste häviää (Valkama ym. 2011, Valkama ym. 2015). Tämän jälkeen satotasoa voidaan ylläpitää poistumaa vastaavilla fosforilisäyksillä tai niistä voidaan luopua kokonaan joksikin aikaa. Suurimmalla osalla Suomen pelloista fosforipitoisuus on sellaisella tasolla, ettei fosforilannoituksella saada sadonlisää (Uusitalo ym. 2007b). Tällöin runsas fosforilannoitus aiheuttaa vain lisäkulun viljelijälle ja huuhtoumariskin. Puutarhakasvien myyntituotto on kuitenkin suuri suhteessa lannoitekustannuksiin, joten yksityistaloudellinen paine fosforinkäytön vähentämiseen voi olla vähäinen.

Ravinteiden käytön tehokkuutta voidaan kuvata erilaisilla tunnusluvuilla, jotka kertovat, kuinka tehokkaasti kasvi hyödyntää saatavilla olevia ravinteita sadon tai biomassan tuotantoon. Jos ravinteiden hyödyntäminen on heikkoa, kasveja on lannoitettava runsaasti, mikä lisää viljelyn kustannuksia ja ympäristöriskejä. Ravinteiden käytön tehokkuutta voidaan parantaa käyttämällä sopivaa lannoitustasoa, tehokasta ravinteiden lähdettä, sopivaa lannoituksen ajoitusta ja levitystapaa, kasvilaji- ja -lajikevalinnalla sekä vähentämällä kasvin abioottista ja bioottista stressiä (Baligar ja Fageria 2015). Tehokkuutta voidaan kuvata esimerkiksi laskemalla lannoituksella saatu sadonlisä suhteessa lannoitteena annetun ravinteen määrään (agronominen tehokkuus, AE), sadonlisä tai biomassan kasvu suhteessa ravinteen oton kasvuun tai osuus, jonka kasvi ottaa lannoitteena annetusta ravinteesta (lannoitefosforin hyödynnystehokkuus, ARE) (Baligar ja Fageria 2015).

2.4 Fosforilannoituksen ympäristövaikutukset

Ravinnevalumat pelloilta aiheuttavat ravinteiden kertymistä vesistöihin, josta voi seurata rehevöitymistä eli kasvillisuuden runsastumista, vesistöjen umpeenkasvua, suuria leväkukintoja, talvinen happikato ja eliöstön muutoksia. Rehevöitymisen kannalta keskeiset ravinteet ovat typpi ja fosfori (Smil 2000). Typpi- ja fosforivalumiin on todettu olevan geneettisen monimuotoisuuden vähenemisen ohella suurimpia riskejä maapallon ekologiselle kantokyvyille (Steffen ym. 2015). Maaperän fosforipitoisuuden on todettu olevan yhteydessä valumiin, ja peltomaan fosforin kokonaismäärä ja helppoliukoisin fosforin määrä ovatkin merkittäviä fosforikuormitukseen vaikuttavia taustatekijöitä.

Itämeressä rehevöityminen on huomattava ongelma, koska se on matala, kerrostunut vesialue, jolla veden viipymä on pitkä (Uusitalo ym. 2007b). Maatalous on merkittävä Itämeren alueen fosforikuormituksen lähde. Suomessa maatalous aiheuttaa 60 % ihmis-toiminnan seurauksena syntyvästä Itämeren fosforikuormasta (Turtola ja Lemola 2008). Fosforin aiheuttama rehevöityminen on huomattavinta Saaristomerellä, mutta myös Suomenlahden rannikolla sekä Kyrönjoen ja Kokemäenjoen edustoilla (Uusitalo ym.

2007a). Itämeren suojelukomissio pyrkii vähentämään Suomen fosforipäästöjä 330 tonnia vuosien 1997-2003 keskiarvosta vuoteen 2021 mennessä (Baltic Marine Environment Protection Commission 2013).

Suomen osuus Itämeren fosforikuormituksesta on pieni verrattuna muihin Itämeren ympärysvaltioihin, mutta kuormituksemme vaikuttaa omiin sisä- ja rannikkovesiimme (Kirkkala ym. 1998, Uusitalo ym. 2007a). Fosfori on avaintekijä Suomen sisävesien laadun heikkenemisessä. Littoistenjärven kemikaalipuhdistus keväällä 2017 on esimerkki sisävesiemme rehevöitymisen seurauksista (Littoistenjärven osakaskuntien hoitokunta 2017).

Puutarhakasvien fosforilannoituksen vaikutus vesien ravinnekuormitukseen on pieni kokonaisravinnekuormituksen kannalta, mutta paikallisesti merkitys voi olla suuri (Grönroos ym. 2007). Maatalouden ympäristötuen vaikuttavuuden seurantatutkimusten raporteissa erikoiskasvien laajaa viljelyä ja korkeita fosforilannoitustasoja pidetään syynä suuriin fosforipitoisuuksiin Saaristomeren valuma-alueilla (Aakkula ym. 2010). Raporteissa esitetään toimenpidesuosituksena erikoiskasvien fosforilannoituksen alentamista, sillä lannoituksen rajoittaminen vähentää maan helppoliukoisen fosforin määrää ja siten fosforihuuhtoumaa.

3 KERÄKAALI

3.1 Keräkaali viljelykasvina

Kerä- eli valkokaali kuuluu ristikukkaiskasvien (*Brassicaceae*) heimoon ja kaalien (*Brassica* L.) sukuun, joka on ihmisen monipuolisimmin hyödyntämä kasvisuku (Dixon ja Dickson 2007). Suvussa on kymmeniä taloudellisesti tärkeitä lajeja, alalajeja ja muunnoksia, joita käytetään öljy-, rehu- ja maustekasveina sekä vihanneksina, esimerkiksi rypsi (*Brassica rapa* L. Oleifera-Ryhmä), rapsi (*Brassica napus* subsp. *oleifera* (DC.) Metzg.), nauris (*Brassica rapa* L.) ja lanttu (*Brassica napus* subsp. *napobrassica* (L.) Hanelt). Lähes kaikki tärkeimmistä Suomessa viljellyistä kaalilajeista kuuluvat *Brassica oleracea* L. -ryhmään

(Aaltonen 2000). Viljeltyjä kaalilajeja ovat esimerkiksi kurttu- eli savoijinkaali (*Brassica oleracea* L. Sabauda-Ryhmä), kukkakaali (*Brassica oleracea* L. Botrytis-Ryhmä), parsakaali (*Brassica oleracea* L. Italica-Ryhmä), ruusukaali (*Brassica oleracea* L. Gemmifera-Ryhmä) ja kyssäkaali (*Brassica oleracea* L. Gongylodes-Ryhmä). Viljellyistä kaaleista hyödynnetään joko kerä, nuori kukinto, lehdet tai varsimukula (Voipio 2001).

Keräkaali kuuluu puna- ja suippokaalin ohella Capitata-Ryhmään. Ryhmän kaaleista jalostettiin aikaisella keskiajalla Luoteis-Euroopassa lukuisia muunnoksia hyödynnettäväksi ihmisravintona, lääkkeenä ja rehuna, ja ne olivat aikoinaan tärkeitä vitamiinien lähteitä (Dixon ja Dickson 2007). Keräkaali on muunnoksista taloudellisesti merkittävin, ja siitä on lukuisia lajikkeita (Voipio 2001, Luken tilastopalvelut 2019b). Nykyään sitä viljellään ympäri maailmaa viileillä seuduilla, eniten Aasiassa ja Euroopassa (Voipio 2001). Suurin osa keräkaalin lajikkeista on nykyään F₁-hybridejä (Dixon ja Dickson 2007).

Keräkaalin elämänsykli on kaksivuotinen, mutta sitä viljellään yksivuotisena (Dixon ja Dickson 2007). Alalehdet muodostavat ruusukkeen ja ylälehdet kerrostuvat tiiviiksi keräksi latvan kasvupisteen ympärille (Dixon ja Dickson 2007). Juuret ovat ohuita ja runsaasti haaroittuneita. Juurista 90 % on 20-30 cm syvyydessä maanpinnasta, mutta osa kaivautuu 1,5-2 m syvyyteen (Dixon ja Dickson 2007).

Keräkaali on päiväneutraali kasvi, joka on sopeutunut merelliseen, lauhkeaan ilmastoon (Voipio 2001). Kasvun optimilämpötila on 15-20 °C, mutta karaistuneet taimet ja syksyn keräsato kestävät lyhytaikaisia pakkasiakin (Voipio 2001). Keräkaalin tasainen veden-saanti on tärkeää, jotta välttyään halkeamilta ja sisälehtien lehdenreunapoltteelta (Voipio 2001). Kaalien kantamuodot olivat sopeutuneet selviämään haastavissa, kuivissa ympäristöissä, joissa ravinteita oli vähän saatavilla, mutta jalostetuilla muodoilla on suuri satovaste veteen ja ravinteisiin, etenkin typpeen (Dixon ja Dickson 2007).

Luonnonvarakeskuksen tilastopalvelujen (2019) mukaan keräkaali on viljelypinta-alaltaan Suomen neljänneksi merkittävin avomaavihannes herneen (*Pisum sativum* L.), porkkanan (*Daucus carota* L. subsp. *sativus*) ja ruokasipulin (*Allium cepa* L. Cepa-Ryhmä) jälkeen. Keräkaalin viljelypinta-ala oli 542 hehtaaria ja sato 19 160 tonnia vuonna 2018.

Tuotantokeskittymät ovat Pohjanmaalla ja Satakunnassa. Keräkaalia viljellään pääasiassa avomaalla, varhaisviljelyä on myös kausihuoneissa. Viljelyyn sopivat monenlaiset maalajit, mutta maan ravinnetilan tulee olla hyvä ja edullisin maan pH on 6,5-7,5 (Voipio 2001). Kasvuaika istutuksesta sadonkorjuuseen vaihtelee varhaisviljeltävien kesäkaalien 50-60 vuorokaudesta talvikaalien yli 110 vuorokauteen (Aaltonen 2000, Voipio 2001). Syys- ja talvikaaleja kasvatetaan myös varastokaaleiksi. Pitkän kasvuajan vuoksi taimet esikasvatetaan (Voipio 2001). Lannoitus annetaan osissa ja peltoa kastellaan tarvittaessa.

Keräkaalille tuhoa aiheuttavia kasvitauteja ovat muiden muassa kaalin taimipolte (*Rhizoctonia sp.* DC.), möhöjuuri (*Plasmodiophora brassicae* Wor.) sekä varastoidulla kaalilla harmaahome (*Botrytis cinerea* Pers.) ja pahkahome (*Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary) (Aaltonen 2000, Parikka 2012). Merkittäviä tuholaisia ovat juuria vahingoittavat ison kaalikärpäsen (*Delia floralis* Fallén) ja pienen kaalikärpäsen (*Delia radicum* L.) toukat sekä lehtiä syövät kirpat (*Phyllotreta sp.* Chevrolat in Dejean) sekä kaalikoin (*Plutella xylostella* L.) ja kaaliperhosen (*Pieris brassicae* L.) toukat (Aaltonen 2000, Nissinen 2012). Maa- ja kasvijätelevintäisten tautien runsastumisen välttämiseksi keräkaalille suositellaan 4-6 vuoden viljelykiertoa (Aaltonen 2000, Tuomola ym. 2012).

3.2 Keräkaalin lannoitus

Monet vihannekset tarvitsevat runsaasti ravinteita muihin peltokasveihin, kuten viljaan, verrattuna. Myös keräkaalilla on suuri ravinteiden tarve. Ympäristökorvauksen ehdoissa lannoituksen enimmäismäärät ovat multavuudesta riippuen 200-240 kg ha⁻¹ v⁻¹ typpeä ja tyydyttävässä viljavuusluokassa 60 kg ha⁻¹ v⁻¹ fosforia (Ruokavirasto 2019). Lannoitevalmistaja Yara Suomi Oy suosittelee varastokeräkaalilla käytettävän viljavuustutkimuksen viljavuusluokasta riippuen 80-230 kg ha⁻¹ v⁻¹ kaliumia (Yara Suomi Oy 2019). Pääosa lannoituksesta annetaan kylvön tai istutuksen yhteydessä ja typpeä ja kaliumia lisätään kasvukauden aikana.

Maan liian alhaisen ravinnepitoisuuden kasvukauden alussa on todettu heikentävän keräkaalin kasvua (Suojala ym. 2001). Tätä voidaan ehkäistä starttilannoituksella, jossa fosforia lisätään kylvön tai istutuksen yhteydessä siemenen tai taimen lähelle kasvuun lähdön edistämiseksi. Keräkaali on syväjuurinen ja tehokas ravinteiden ottaja ja hyödynnäjä, joka tuottaa paljon lehtimassaa (Dechassa ym. 2003). Keräsadon korjuun jälkeen pellolle jää paljon maanpäällistä kasvimassaa, jopa yli 30 000 kg ha⁻¹, ja siten myös runsaasti ravinteita (Voipio 2001).

Keräkaalin fosforilannoituksen suunnittelu perustuu peltolohkon viljavuustutkimukseen, lannoitussuosituksiin, joita tekevät esimerkiksi lannoitevalmistajat ja Farmit.net, sekä maatalouden ympäristökorvausjärjestelmän rajoituksiin. Ympäristökorvaus (entinen ympäristötuki) on viljelijöille ympäristönsuojelullisia toimia vastaan maksettava korvaus, jonka saaminen edellyttää tiettyihin ehtoihin sitoutumista ja vaatii tila- ja lohko-kohtaisia toimenpiteitä, esimerkiksi lannoitusrajojen noudattamista (Ruokavirasto 2019). Viljelijä sitoutuu ympäristökorvauksen ehtoihin viideksi vuodeksi kerrallaan. Sitoutuminen on vapaaehtoista, mutta esimerkiksi viljanviljely on Suomessa käytännössä kannattamatonta ilman ympäristökorvausta, ja erikoiskasvien, myös kaalin, viljelykierrossa on lähes poikkeuksetta myös viljaa. Suurin osa Suomen viljelyalasta ja tiloista onkin mukana järjestelmässä.

Ympäristökorvauksen lannoitusrajojen tarkoituksena on rajoittaa ympäristöriskejä niin, että hyvä sato on kuitenkin mahdollinen. Maksimilannoitusmäärät riippuvat viljeltävästä kasvilajista ja peltolohkon viljavuusluokasta. Keräkaalin fosforilannoituksen maksimi-määriä pienennettiin hyvässä ja korkeassa viljavuusluokassa ympäristötuen muuttuessa ympäristökorvaukseksi vuonna 2015 (taulukko 1). Rajat eivät perustu tutkittuihin sato-vasteisiin, koska tutkimustietoa ei ole juurikaan saatavilla. Ulkomailta maan fosforitilan mittauksessa käytetään eri uuttomenetelmiä kuin Suomessa, joten esimerkiksi pohjois-maisia tutkimustuloksia ei voida sellaisenaan hyödyntää fosforilannoituksen suunnitte-lussa.

Taulukko 1. Ympäristötuen (voimassa vuoteen 2014 asti) ja ympäristökorvauksen (voimassa vuodesta 2015 alkaen) kaalien fosforilannoituksen enimmäismäärät ($\text{kg ha}^{-1} \text{v}^{-1}$) fosforiviljavuusluokan perusteella (maaseutuvirasto 2015).

| Vuosi | P-viljavuusluokka | | | | | |
|-------|------------------------|----------|------------|------|--------|------------------------|
| | Huono/ huononlainen | Välttävä | Tyydyttävä | Hyvä | Korkea | Arveluttavan korkea |
| 2014 | 110 | 80 | 60 | 50 | 30 | 10 |
| 2015 | 110 | 80 | 60 | 40 | 25 | 10 |

4 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tässä tutkimuksessa pyrittiin tuottamaan tietoa keräkaalin lannoitussuosituksen päivittämiseksi, jotta varmistetaan hyvä sato, mutta pienennetään huuhtoumariskiä. Tavoitteena oli selvittää, miten fosforilannoitus vaikuttaa keräkaalin satoon ja fosforin ottoon sekä fosforin peltotaseeseen fosforipitoisuudeltaan erilaisilla mailla. Hypoteesina oli, että fosforilannoitus vaikuttaa sadon määrään, mutta vaikutus on erilainen fosforipitoisuuksiltaan erilaisissa maissa.

5 AINEISTO JA MENETELMÄT

5.1 Kasviaineisto ja ympäristötekijät

Kasvukauden 2016 aikana tehtiin keräkaalin fosforilannoituskoe käyttäen lajiketta 'Lennox F₁', joka on Suomessa yleisesti viljelty talvilajike ja jonka kasvu aika on 145 vuorokautta (Puutarhaliike Helle Oy 2019). Taimet olivat peräisin Alankomaista ja ne toimitti Kasvis-Kartano Oy Köyliöstä. Ne oli lähtömaassaan käsitelty tuholaistorjuntavalmisteen Spintor, jonka tehoaine on spinosad. Taimet olivat huomattavan vahvoja ja tasalaatuisia.

Kokeet toteutettiin Luonnonvarakeskuksen Piikkiön toimipaikassa peltolohkoilla, joista toisen viljavuusluokka fosforin suhteen (P-viljavuusluokka) oli korkea ja toisen välttävä (liite 1). Kokeet olivat osa sarjaa, jossa samat kokeet toistettiin joka kasvukaudella vuo-

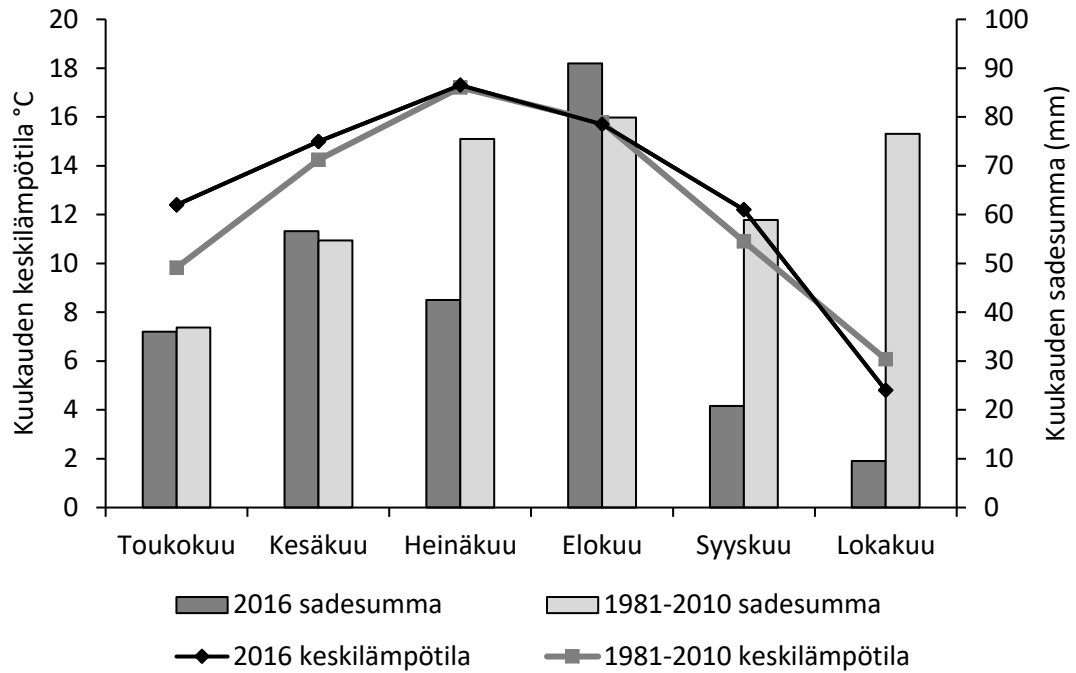
sina 2014-2016. Korkean P-viljavuusluokan koepelto oli maalajiltaan multava, paikoittain runsasmultainen, hiekkainen karkea hieta. Maan pH oli ennen peruslannoitusta keskimäärin 7,0 ja multavissa koeruuduissa oli 29-43 mg l⁻¹ ja runsasmultaisissa koeruuduissa 32 mg l⁻¹ fosforia (taulukko 2). Välttävän P-viljavuusluokan koepelto oli maalajiltaan runsasmultaista hiuesavea ja sen koeruutujen pH oli ennen peruslannoitusta keskimäärin 5,8 ja fosforipitoisuus 5-6,8 mg l⁻¹. Esikasvina molemmilla peltolohkoilla oli kevätvehnä (*Triticum aestivum* L.).

Luonnonvarakeskuksen Piikkiön toimipaikka sijaitsee Varsinais-Suomessa, noin 20 kilometrin päässä Turusta, N 60° 23' E 22° 33' (WGS 84). Alue on alavalla niityllä merenlahden rannalla, 6 m merenpinnan yläpuolella, ja sitä suojaavat länsipuolelta korkeat mäet (Ilmatieteen laitos 2016).

Taulukko 2. Korkean ja välttävän P-viljavuusluokan kokeiden maan viljavuustutkimuksen mukainen ravinnetilanne ennen koetta: fosfori (P), kalsium (Ca), kalium (K), magnesium (Mg), rikki (S), boori (B), kupari (Cu), mangaani (Mn) ja sinkki (Zn). Luvut ovat koeruutujen keskiarvoja (korkean P-viljavuusluokan koepellolla n = 16 ja välttävän P-viljavuusluokan koepellolla n = 20) lukuun ottamatta tähdellä (*) merkittyjä ravinneanalyysijä, joita varten otettiin yksi näyte kustakin lohkoista (n = 4).

| | Ravinnemäärä (mg l ⁻¹) | | | | | | | | |
|-------------------|------------------------------------|------|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|
| | P | Ca | K | Mg | S | B* | Cu* | Mn* | Zn* |
| Korkea P-luokka | 36,0 | 1700 | 140 | 160 | 4,8 | 0,4 | 10,0 | 15 | 4,0 |
| Välttävä P-luokka | 5,8 | 1800 | 390 | 350 | 15,4 | 0,6 | 8,4 | 14 | 3,5 |

Kasvukauden 2016 lämpötilat olivat lähellä vuosittaisia vertailuarvoja lukuun ottamatta toukokuuta, joka oli tavallista lämpimämpi (kuva 1). Hellettä oli viiden päivän jaksena touko-kesäkuun vaihteessa sekä muutamana yksittäisenä päivänä myöhemmin. Heinäkuu ja etenkin syys-lokakuu olivat vähäsateisia. Kasvukauden suurin vuorokauden aikana satanut sademäärä oli 22 mm 17.6.2016.



Kuva 1. Kasvukauden kuukausittaiset keskilämpötilat ja sadesummat koealueella vuonna 2016 sekä vertailuarvoina keskiarvot vuosilta 1981-2010 Ilmatieteenlaitoksen sääasemalla Luonnonvarakeskus Piikkiössä.

5.2 Käsittelyt

Korkean P-viljavuusluokan kokeen eri käsittelyissä lisättiin 0, 5, 15 ja 32 kg ha⁻¹ fosforia (taulukko 3). Välttävän P-viljavuusluokan kokeessa käsittelyt olivat 0, 20, 51 ja 100 kg ha⁻¹ fosforia (taulukko 4). Näiden lisäksi välttävän P-viljavuusluokan kokeessa tehtiin käsittely, jossa fosforilannoituksen 20 kg ha⁻¹ lisäksi käytettiin starttilannoitetta, joka sisälsi 10 kg ha⁻¹ fosforia. Samalla koealueella tutkittiin myös Rhizocell-mikrobivalmistekäsittelyä, jonka tuloksia ei käsitellä tässä tutkielmassa.

Lannoitustasot valittiin ennen koesarjan aloitusta vuonna 2014 peltojen viljavuustulosten perusteella. Korkean P-viljavuusluokan koepellon viljavuusluokka fosforin suhteen oli silloin korkea ja välttävän P-viljavuusluokan kokeen tyydyttävä. Lannoitteet lahjoitti Yara Suomi Oy, pääosin vuonna 2014. Starttilannoite oli jauhemainen, veteen liuotettava Ferticare 10-52-17 (Yara Vlaardingen B.V., Vlaardingen, Alankomaat). Korkeimmat

lannoitustasot valittiin koesarjan alussa siten, että ne olivat suurimpia ympäristötuen sallimia fosforilannoitusmääriä suurempia.

Fosfori lisättiin maahan keväällä ennen istutusta (24.-25.5.2016) ja täydennyslannoituksena annettiin vain muita ravinteita. Muita ravinteita annettiin kaikkiin koeruutuihin saman verran ja lannoitussuunnitelma perustui niiden osalta viljavuustutkimuksen tuloksiin ja kasvien tarpeeseen.

Taulukko 3. Korkean P-viljavuusluokan kokeen peruslannoitus käsittelyittäin. Valmistajien tiedot on merkitty alaviitteisiin.

| Käsittely | Lannoitevalmiste | kg ha ⁻¹ | Ravinnemäärä kg ha ⁻¹ | | |
|--------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|-----------|------------|
| | | | Typpi | Fosfori | Kalium |
| 0 kg P ha⁻¹ | Hivenravinneseos ¹ | 250 | - | - | - |
| | Tärkkelysperunan NK ² | 571 | 80,0 | - | 120 |
| | Yhteensä | | 80,0 | - | 120 |
| 5 kg P ha⁻¹ | Hivenravinneseos | 250 | - | - | - |
| | Tärkkelysperunan NK | 571 | 80,0 | - | 120 |
| | Starttiravinne ³ | 22 | 2,0 | 5 | - |
| | Yhteensä | | 82,0 | 5 | 120 |
| 15 kg P ha⁻¹ | Hivenravinneseos | 250 | - | - | - |
| | Tärkkelysperunan NK | 525 | 73,5 | - | 110 |
| | Starttiravinne | 65 | 6,5 | 15 | - |
| | Yhteensä | | 80,0 | 15 | 110 |
| 32 kg P ha⁻¹ | Hivenravinneseos | 250 | - | - | - |
| | Puutarhan Y3 ² | 636 | 70,0 | 32 | 115 |
| | Suomensalpietari ² | 32 | 10,0 | - | - |
| | Yhteensä | | 80,0 | 32 | 115 |

¹Yara Suomi Oy, Harjavalta

²Yara Suomi Oy, Uusikaupunki

³EuroChem Phosphorit, Jaama, Venäjä

Taulukko 4. Välttävän P-viljavuusluokan kokeen peruslannoitus käsittelyittäin. Valmistajien tiedot on merkitty alaviitteisiin.

| Käsittely | Lannoitevalmiste | kg ha ⁻¹ | Ravinnemäärä kg ha ⁻¹ | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------|------------|
| | | | Typpi | Fosfori | Kalium |
| 0 kg P ha⁻¹ | Hivenravinneseos ¹ | 250 | - | - | - |
| | Tärkkelysperunan NK ² | 571 | 80 | - | 120 |
| | Yhteensä | | 80 | - | 120 |
| 20 kg P ha⁻¹ | Hivenravinneseos | 250 | - | - | - |
| | Tärkkelysperunan Y1 ² | 500 | 60 | 20 | 85 |
| | Kaliumsulfaatti ³ | 90 | - | - | 36 |
| | Suomensalpietari ² | 74 | 20 | - | 1 |
| | Yhteensä | | 80 | 20 | 122 |
| 20+10 kg P ha⁻¹ | Hivenravinneseos | 250 | - | - | - |
| | Tärkkelysperunan Y1 | 500 | 60 | 20 | 85 |
| | Kaliumsulfaatti | 90 | - | - | 36 |
| | Suomensalpietari | 74 | 20 | - | 1 |
| | Ferticare 10-52-17 ⁴ | | 5 | 10 | 6 |
| | Yhteensä | | 85 | 30 | 128 |
| 51 kg P ha⁻¹ | Hivenravinneseos | 250 | - | - | - |
| | Puutarhan NK ² | 444 | 40 | - | 124 |
| | Starttiravinne ⁵ | 220 | 26 | 51 | - |
| | Suomensalpietari | 50 | 13 | - | - |
| | Yhteensä | | 79 | 51 | 124 |
| 100 kg P ha⁻¹ | Hivenravinneseos | 250 | - | - | - |
| | Starttiravinne | 434 | 52 | 100 | - |
| | Puutarhan NK2 | 333 | 30 | - | 93 |
| | Kaliumsulfaatti | 67 | - | - | 27 |
| | yhteensä | | 82 | 100 | 120 |

¹Yara Suomi Oy, Harjavalta

²Yara Suomi Oy, Uusikaupunki

³Yara Suomi Oy, Kokkola

⁴Yara Vlaardingen B.V., Vlaardingen, Alankomaat

⁵EuroChem Phosphorit, Jaama, Venäjä

5.3 Koeasetelma

Tutkimusasetelmana oli satunnaistettujen täydellisten lohkojen koe, jossa oli neljä lohkoa, mikä on tyypillinen määrä avomaakokeessa. Koealueiden muoto ja koeruutujen koot suunniteltiin käytettävissä olevien hyönteisverkkojen ja maan tasalaatuisuuden perusteella. Korkean P-viljavuusluokan koealue jakautui kahteen kaistaan, joiden välissä oli traktorin mukaan mitoitettu ruiskutuskaista (liite 2). Koeala oli ruiskutuskaista pois lu-

kien yhteensä 273,6 m² ja kukin koeruutu oli kooltaan 3 x 5,4 m. Välttävän P-viljavuusluokan peltolohkolla oli yhtenäinen, pinta-alaltaan 372,96 m² koealue, jonka kukin koeruutu oli kooltaan 4,2 x 3,6 m (liite 3).

Rivi- ja taimiväli oli molemmissa kokeissa 60 cm ja kasvutiheys 28 000 tainta hehtaaria kohti. Korkean P-viljavuusluokan kokeen kussakin ruudussa oli 9 riviä ja yhteensä 45 tainta, joista keskimmäiset 21 tainta käytettiin satonäytteeksi (liite 2). Välttävän P-viljavuusluokan kokeen ruuduissa oli 6 riviä ja 42 tainta, joista keskimmäiset 20 tainta olivat satonäytekasveja (liite 3). Kaistojen päädyissä oli suojarivi ja jokaisen ruudun yksi reuna oli koealueen reunassa. Mittauksiin käytettiin ruutujen keskellä olevia taimia.

5.4 Kokeiden hoito

Keräkaali istutettiin toukokuun lopulla ja sato korjattiin syyskuun lopulla (taulukko 5). Keväällä, ennen istutusta, tehtiin käsittelyjen mukainen peruslannoitus kuhunkin ruutuun. Kumpikin koe peitettiin istutuksen jälkeen hyönteisverkolla, jolla pyrittiin estämään kaalikärpäsien ja muiden tuholaisten pääsy kasvien luo. Korkean P-viljavuusluokan kokeessa käytetty verkko oli silmäkooltaan 0,77 x 1,44 mm ja välttävän P-viljavuusluokan kokeessa 1,3 x 1,3 mm. Verkon reunat haudattiin maahan ja se poistettiin vain kolmesti kasvukauden aikana hoitotoimenpiteiden ja näytteenoton ajaksi (taulukko 5).

Verkon avauksen yhteydessä viikoilla 25, 28 ja 30 kitkettiin rikkakasvit tarpeen mukaan ja tehtiin täydennyslannoitukset samana tai eri kokeissa peräkkäisinä päivinä (taulukko 6). Koepeltoja sadetettiin tarvittaessa. Sadetustarvetta arvioitiin kahdesti viikossa luetavien, 20 ja 40 cm syvyyteen asennettujen tensiometrien (TM-93, Nieuwkoop BV) sekä sademittarien avulla. Sadetuksen kynnyksarvona oli noin -300 millibaarin tensiometriliukema, mutta tarpeen arvioinnissa huomioitiin myös sääennuste.

Molempien kokeiden kasveissa havaittiin kasvukauden aikana kaalikoita ja sen tekemiä tuhoja hyönteisverkosta huolimatta. Kokeet käsiteltiin kaalikoita ja –kärpystä vastaan

verkon päältä Karate Zeon -kasvinsuojeluaineella (Syngenta Nordics A/S) jokaisen verkon avauksen jälkeen, viikoilla 25, 28 ja 30. Ainetta annosteltiin valmistajan ohjeen mukaisesti, 60 ml ha⁻¹. Karate Zeonin tehoaine on lambda-syhalotriini (100 g l⁻¹).

Taulukko 5. Kokeiden työvaiheiden ajoitus.

| Päivämäärä | Työvaihe |
|---------------|--|
| 17.-18.5.2016 | Ruudutus ja maanäytteiden otto |
| 23.5.2016 | Peruslannoitus ruuduittain |
| 24.-25.5.2016 | Istutus ja verkotus |
| 21.-22.6.2016 | Verkon avaus: täydennyslannoitus |
| 23.6.2016 | Karate Zeon -ruiskutus |
| 11.-12.7.2016 | Verkon avaus: täydennyslannoitus, maa- ja lehtinäytteiden otto |
| 13.7.2016 | Karate Zeon -ruiskutus |
| 25.7.2016 | Verkon avaus: täydennyslannoitus |
| 26.7.2016 | Karate Zeon -ruiskutus |
| 26.-27.9.2016 | Sadonkorjuu |
| 27.9.2016 | Maa- ja kasvinäytteiden otto |

Taulukko 6. Koepelloille tehdyt täydennyslannoitukset.

| Ajoitus | Lannoite | Määrä (kg ha ⁻¹) | Ravinnemäärät (kg ha ⁻¹) | | |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|----------|------------|
| | | | Typpi | Fosfori | Kalium |
| 21.-22.6.2016 | Puutarhan NK2 ¹ | 450 | 41 | - | 126 |
| 11.-12.7.2016 | YaraLiva Nitrabor ² | 250 | 40 | - | - |
| 25.7.2016 | Suomensalpietari ¹ | 200 | 54 | - | 2 |
| Yhteensä | | | 135 | - | 128 |

¹Yara Suomi Oy, Uusikaupunki

²Yara International ASA, Porsgrunn, Norja

5.5 Mittaukset ja analyysit

Maan viljavuustutkimusta varten otettiin maanäytteet muokkauskerroksesta koeruudittain ennen koetta ja sadonkorjuun aikaan. Eurofins Viljavuuspalvelu Oy (Mikkeli, Suomi) analysoi maanäytteistä pintamaan maalajin, multavuuden, johtoluvun, happa-

muuden ja ravinnetilan kalsiumin, fosforin, kaliumin, magnesiumin, rikin, boorin, kuparin, mangaanin ja sinkin suhteen sekä laskennallisen kationinvaihtokapasiteetin ja eri kationien osuudet. Maan fosforitila tutkittiin Vuorisen ja Mäkitien (1955) menetelmällä.

Kerimisen alkaessa otettiin verkon avaamisen yhteydessä 11.-12.7.2016 lehtinäytteet, joista tehtiin kasvianalyysi. Näytteeseen kerättiin nuorimpia täysin kehittyneitä lehtiä, kahdeksan lehteä kustakin ruudusta. Lehdet halkaistiin pituussuuntaan ja analyysiin lähetettiin puolikas kustakin lehdestä. Lancrop Laboratories (York, Iso-Britannia) tutki näytteiden fosforipitoisuuden.

Sadonkorjuun aikaan kunkin ruudun satonäytekasveista valittiin satunnaisesti neljä näytekasvia, joiden kauppakunnostuksessa erotellut ulkolehdet ja kerät punnittiin erikseen. Lopuista satonäytekasveista korjattiin pelkät kerät. Kaikkien satonäytekasvien kerät lajiteltiin kauppakelpoisuuden mukaan, laskettiin ja punnittiin. Lajittelussa hylkäämisen syynä olivat kasvitaudit ja moniosaiset kerät, jotka saattoivat johtua esimerkiksi ludeviotuksesta. Fosforilannoituksen määrän ei arvioitu vaikuttaneen kauppakelpoisuuteen.

Kunkin ruudun jokaisen näytekasvin ulkolehdistä otettiin yksi nuori ja yksi vanhempi lehti, jotka halkaistiin pituussuuntaan ja kustakin otettiin puolikas. Ruudun näytekasvien lehdenpuolikkaat silputtiin ja silpusta otettiin satunnainen näyte, josta mitattiin tuorepaino. Näyte kuivattiin 60 °C:ssa kunnes paino ei enää laskenut eli noin viikon ajan, ja siitä mitattiin kuivapaino. Vastaavasti keristä leikatuista lohkoista tehtiin satonäyte, josta mitattiin tuore- ja kuivapaino.

Sadon ja ulkolehtien kivennäis- ja hivenalkuaineiden pitoisuudet määritettiin Luonnonvarakeskuksen laboratoriossa Jokioisissa. Kasvinäytteen (noin 0,5 g) orgaaninen aines hajotettiin polttamalla väkevässä typpihapossa polttohauteessa märkäpolttolaitteella (FOSS Tecator Digestor Auto, FOSS Analytical A/S Co Ltd., Kiina). Liuennut näyte laimennettiin 50 ml mittapulloon ja suodatettiin. Kivennäis- ja hivenaineet mitattiin ICP OES -spektrometrillä (Optima 8300 ICP-OES, Perkin Elmer Inc., Shelton, USA). Jokaisessa polt-

toerässä oli mukana kaksi kontrollia pelkillä reagensseilla ilman näytettä ja kaksi referenssimateriaalinäytettä (heinä ja porkkana), joiden kivennäis- ja hivenaineiden pitoisuudet tiedettiin.

Kerien ja ulkolehtien fosforin otto hehtaaria kohti laskettiin kullekin koeruudulle seuraavasti:

$$O = \frac{M_K}{M_T} \times S \times P \quad (1)$$

jossa

O = fosforin otto (kg P ha^{-1})

M_K = kasvinäytteen kuivapaino (g)

M_T = kasvinäytteen tuorepaino (g)

S = keräsato tai ulkolehtien määrä (t ha^{-1})

P = kasvinosan kuiva-aineen fosforipitoisuus (g kg^{-1} ka)

Kasvuston fosforin otto (kg ha^{-1}) saatiin laskemalla yhteen kerien ja ulkolehtien fosforin otot.

Peltotase laskettiin kullekin koeruudulle lisätyn ja poistuneen fosforimäärän erotuksena kaavalla:

$$T_P = L_P - O_K \quad (2)$$

jossa

T_P = fosforin peltotase (kg P ha^{-1})

L_P = lannoitteena lisätty fosfori (kg P ha^{-1})

O_K = kerien fosforin otto (kg P ha^{-1})

Agronominen tehokkuus AE (agronomic efficiency) kertoo lannoittamalla saadun sadonlisän suhteessa lannoitteena lisättyyn fosforimäärään. AE laskettiin kunkin käsittelyn ruutujen hehtaariohaisista keskiarvoista Baligarin ja Fagerian (2015) kaavalla:

$$AE = \frac{(S_P - S_0)}{L_P} \quad (3)$$

jossa

AE = agronominen tehokkuus (kg kg^{-1})

S_P = lannoitetun ruudun kokonaissato (kg ha^{-1})

S_0 = lannoittamattoman ruudun kokonaissato (kg ha^{-1})

L_P = lannoitteena lisätty fosfori (kg P ha^{-1})

Lannoitefosforin hyödynnystehokkuus ARE (apparent recovery efficiency) kertoo fosforinoton kasvun suhteessa fosforilannoitusmäärään. ARE laskettiin kunkin käsittelyn ruutujen keskiarvoista Baligarin ja Fagerian (2015) kaavalla:

$$ARE = \frac{O_P - O_0}{L_P} \times 100 \quad (4)$$

jossa

ARE = lannoitefosforin hyödynnys (%)

O_P = lannoitetun ruudun fosforin otto (kg P ha^{-1})

O_0 = lannoittamattoman ruudun fosforin otto (kg P ha^{-1})

L_P = lannoitteena lisätty fosfori (kg P ha^{-1})

Tuloksille tehtiin tilastollinen analyysi sekamallilla (mixed model), jossa kiinteänä selittävänä muuttujana oli lannoituskäsittely ja satunnaismuuttujana lohko. Analyysi tehtiin SPSS-ohjelmistolla (versio 24.0, IBM Corp., Armonk, NY, USA).

6 TULOKSET

Korkean P-viljavuusluokan kokeessa käsittely ei vaikuttanut keskimääräiseen kokonaissatoon, kauppakelpoisen sadon määrään, kauppakelpoisten kerien keskipainoon tai kasvien fosforipitoisuuksiin kerimisen alkaessa tai sadonkorjuun aikaan (taulukot 7, 8). Myöskään kasvien fosforin otossa ei ollut eroa käsittelyiden välillä (taulukko 9). Kasvusto

otti fosforia 0,6 kg satotonna kohden ja 49-51 % fosforista oli ulkolehdissä eli satojätteessä. Peltotase kasvoi lannoitusmäärän kasvaessa, mutta oli kaikissa käsittelyissä negatiivinen, vaihdellen -1 kg P ha^{-1} ja -31 kg P ha^{-1} välillä (kuva 2). Erot maan fosforipitoisuuksissa ennen koetta ja sen jälkeen olivat pieniä (taulukko 10).

Taulukko 7. Korkean P-viljavuusluokan kokeen kokonaissato, kauppakelpoinen sato ja kauppakelpoisen kerän paino. Luvut ovat koeruutujen keskiarvoja \pm keskihajonta ($n = 4$).

| Käsittely | Kokonaissato (t ha ⁻¹) | Kauppakelpoinen sato (t ha ⁻¹) | Kerän paino (kg) |
|--------------------------|---------------------------------------|---|---------------------|
| 0 kg P ha ⁻¹ | 84,1 \pm 2,6 | 84,1 \pm 2,6 | 3,0 \pm 0,1 |
| 5 kg P ha ⁻¹ | 82,8 \pm 2,3 | 81,0 \pm 3,7 | 3,0 \pm 0,1 |
| 15 kg P ha ⁻¹ | 86,5 \pm 1,7 | 84,2 \pm 4,7 | 3,1 \pm 0,1 |
| 32 kg P ha ⁻¹ | 84,0 \pm 2,6 | 83,0 \pm 3,4 | 3,0 \pm 0,1 |
| <i>p</i> | e.m. | e.m. | e.m. |

e.m. = ei merkitsevä ($p > 0,05$)

Taulukko 8. Kasvinosien fosforipitoisuus kuiva-ainekiloa kohti korkean P-viljavuusluokan kokeessa kerimisen alkaessa heinäkuussa ja sadonkorjuun aikaan. Luvut ovat koeruutujen keskiarvoja \pm keskihajonta ($n = 4$).

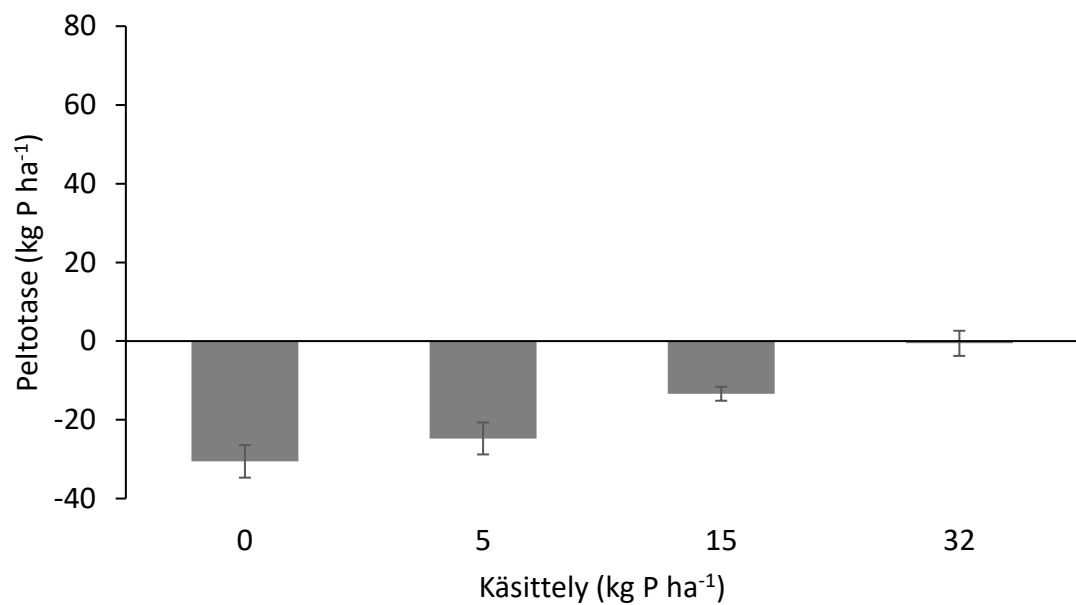
| Käsittely | Lehdet, heinäkuu (g P kg ⁻¹ ka) | Kerä, sadonkorjuu (g P kg ⁻¹ ka) | Ulkolehdet, sadonkorjuu (g P kg ⁻¹ ka) |
|------------|---|--|--|
| 0 kg P/ha | 6,0 \pm 0,2 | 4,2 \pm 0,4 | 3,0 \pm 0,1 |
| 5 kg P/ha | 5,9 \pm 0,5 | 4,3 \pm 0,5 | 3,3 \pm 0,3 |
| 15 kg P/ha | 6,1 \pm 0,4 | 4,2 \pm 0,6 | 3,5 \pm 0,3 |
| 30 kg P/ha | 5,8 \pm 0,3 | 4,7 \pm 0,5 | 3,2 \pm 0,3 |
| <i>p</i> | e.m. | e.m. | e.m. |

e.m. = ei merkitsevä ($p > 0,05$)

Taulukko 9. Kasvien fosforin otto keriin, ulkolehtiin ja maanpäällisiin osiin yhteensä korkean P-viljavuusluokan kokeessa. Luvut ovat neljän kerranteen keskiarvoja \pm keskihajonta.

| Käsittely | Fosforin otto, kerä (kg P ha ⁻¹) | Fosforin otto, ulko- lehdet (kg P ha ⁻¹) | Fosforin otto yhteensä (kg P ha ⁻¹) |
|--------------------------|---|---|--|
| 0 kg P ha ⁻¹ | 30,6 \pm 4,1 | 21,7 \pm 1,7 | 52,3 \pm 5,7 |
| 5 kg P ha ⁻¹ | 29,7 \pm 4,1 | 22,0 \pm 2,3 | 51,8 \pm 6,1 |
| 15 kg P ha ⁻¹ | 28,4 \pm 1,8 | 22,5 \pm 2,5 | 50,9 \pm 3,9 |
| 32 kg P ha ⁻¹ | 30,6 \pm 3,2 | 22,0 \pm 0,3 | 52,6 \pm 3,2 |
| <i>p</i> | e.m. | e.m. | e.m. |

e.m. = ei merkitsevä ($p > 0,05$)



Kuva 2. Peltotaseet korkean P-viljavuusluokan kokeessa. Luvut ovat neljän kerranteen keskiarvoja ja janat kuvaavat keskiarvon keskihajontaa ($n = 4$).

Taulukko 10. Korkean P-viljavuusluokan kokeen maan viljavuustutkimuksen fosforipitoisuudet käsittelyittäin koeruutujen keskiarvoina \pm keskihajonta ennen ja jälkeen kokeen ($n = 4$).

| Käsittely | Fosfori ennen koetta (mg P l ⁻¹) | Fosfori kokeen jälkeen (mg P l ⁻¹) |
|--------------------------|---|---|
| 0 kg P ha ⁻¹ | 36,8 \pm 4,8 | 35,3 \pm 4,6 |
| 5 kg P ha ⁻¹ | 33,8 \pm 2,4 | 33,0 \pm 3,6 |
| 15 kg P ha ⁻¹ | 36,5 \pm 5,4 | 37,8 \pm 5,4 |
| 32 kg P ha ⁻¹ | 37,0 \pm 3,6 | 36,8 \pm 3,3 |
| <i>p</i> | e.m. | e.m. |

e.m. = ei merkitsevä ($p > 0,05$)

Myöskään välttävän P-viljavuusluokan kokeessa käsittelyiden välillä ei ollut eroa kokonaissadon, kauppakelpoisen sadon, kauppakelpoisten kerien painon tai kasvien fosforipitoisuuden suhteen (taulukot 11, 12). Lähes koko sato oli kauppakelpoista, vain kahta satonäytteen kaaleista ei määritetty kauppakelpoisiksi. Käsittely ei vaikuttanut myöskään kasvien fosforin ottoon (taulukko 13). Kasvuston fosforin otto oli 0,6-0,7 kg sato-tonnia kohden ja fosforista 45-47 % oli satojätteessä. Peltotase oli positiivinen lannoitustasosta 20 + 10 kg P ha⁻¹ alkaen (kuva 3). Tässäkään kokeessa maan fosforipitoisuudet eivät muuttuneet merkittävästi kokeen aikana (taulukko 14). Starttilannoituskäsittelyn (20 + 10 kg P ha⁻¹) tulokset eivät eronneet muista käsittelyistä.

Välttävän P-viljavuusluokan kokeessa keskimääräinen kokonaissato, kauppakelpoisten kerien keskipaino ja kasvien fosforin otto olivat pienempiä kuin korkean P-viljavuusluokan kokeessa. Myös heinäkuun kasvinäytteiden fosforipitoisuudet olivat pienempiä välttävän P-viljavuusluokan kokeessa, mutta sadonkorjuun aikaan ero oli pieni. Tarkempi vertailu maan fosforitilan vaikutuksista on vaikeaa, koska otoskoko oli pieni ja kokeissa oli eri käsittelyt.

Taulukko 11. Välttävän P-viljavuusluokan kokeen kokonaissato, kauppakelpoinen sato ja kauppakelpoisen kerän paino. Luvut ovat koeruutujen keskiarvoja \pm keskihajonta ($n = 4$).

| Käsittely | Kokonaissato (t ha ⁻¹) | Kauppakelpoinen sato (t ha ⁻¹) | Kerän paino (kg) |
|-------------------------------|---------------------------------------|---|---------------------|
| 0 kg P ha ⁻¹ | 66,0 \pm 2,3 | 66,0 \pm 2,3 | 2,4 \pm 0,1 |
| 20 kg P ha ⁻¹ | 67,1 \pm 4,7 | 65,5 \pm 6,4 | 2,4 \pm 0,2 |
| 20 + 10 kg P ha ⁻¹ | 69,3 \pm 4,7 | 69,3 \pm 4,7 | 2,5 \pm 0,2 |
| 51 kg P ha ⁻¹ | 68,4 \pm 5,9 | 68,4 \pm 5,9 | 2,5 \pm 0,2 |
| 100 kg P ha ⁻¹ | 65,8 \pm 6,4 | 65,8 \pm 6,4 | 2,4 \pm 0,2 |
| <i>p</i> | e.m. | e.m. | e.m. |

e.m. = ei merkitsevä ($p > 0,05$)

Taulukko 12. Kasvinosien fosforipitoisuus kuiva-ainekiloa kohti välttävän P-viljavuusluokan kokeessa kerimisen alkaessa heinäkuussa ja sadonkorjuun aikaan. Luvut ovat koeruutujen keskiarvoja \pm keskihajonta ($n = 4$).

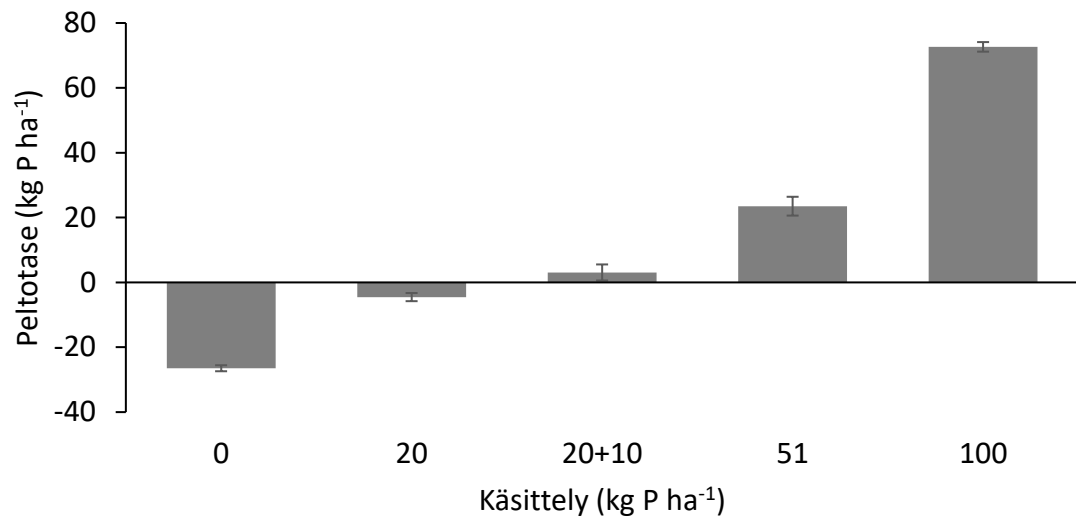
| Käsittely | Lehdet, heinäkuu (g P kg ⁻¹ ka) | Kerä, sadonkorjuu (g P kg ⁻¹ ka) | Ulkolehdet, sadonkorjuu (g P kg ⁻¹ ka) |
|-------------------------------|---|--|--|
| 0 kg P ha ⁻¹ | 4,9 \pm 0,5 | 4,1 \pm 0,3 | 3,0 \pm 0,4 |
| 20 kg P ha ⁻¹ | 4,9 \pm 0,4 | 4,3 \pm 0,7 | 2,9 \pm 0,5 |
| 20 + 10 kg P ha ⁻¹ | 5,0 \pm 0,6 | 4,2 \pm 0,1 | 2,9 \pm 0,3 |
| 51 kg P ha ⁻¹ | 5,0 \pm 0,5 | 4,4 \pm 0,3 | 3,2 \pm 0,2 |
| 100 kg P ha ⁻¹ | 4,7 \pm 0,6 | 4,9 \pm 0,2 | 3,2 \pm 0,4 |
| <i>p</i> | e.m. | e.m. | e.m. |

e.m. = ei merkitsevä ($p > 0,05$)

Taulukko 13. Kasvien fosforin otto keriin, ulkolehtiin ja maanpäällisiin osiin yhteensä välttävän P-viljavuusluokan kokeessa. Luvut ovat neljän kerranteen keskiarvoja \pm keskihajonta.

| Käsittely | Fosforin otto, kerä (kg P ha ⁻¹) | Fosforin otto, ulko- lehdet (kg P ha ⁻¹) | Fosforin otto yhteensä (kg P ha ⁻¹) |
|-------------------------------|---|---|--|
| 0 kg P ha ⁻¹ | 26,5 \pm 0,9 | 18,1 \pm 2,0 | 44,6 \pm 1,2 |
| 20 kg P ha ⁻¹ | 24,5 \pm 1,3 | 14,9 \pm 3,5 | 39,5 \pm 4,8 |
| 20 + 10 kg P ha ⁻¹ | 26,9 \pm 2,5 | 17,1 \pm 0,4 | 44,0 \pm 2,7 |
| 51 kg P ha ⁻¹ | 26,5 \pm 2,9 | 18,4 \pm 2,8 | 44,9 \pm 4,8 |
| 100 kg P ha ⁻¹ | 27,4 \pm 1,5 | 18,0 \pm 2,8 | 45,4 \pm 3,7 |
| <i>p</i> | e.m. | e.m. | e.m. |

e.m. = ei merkitsevä ($p > 0,05$)



Kuva 3. Peltotaseet välttävän P-viljavuusluokan kokeessa. Luvut ovat neljän kerranteen keskiarvoja ja janat kuvaavat keskiarvon keskihajontaa ($n = 4$).

Taulukko 14. Välttävän P-viljavuusluokan kokeen maan viljavuustutkimuksen fosforipitoisuudet käsittelyittäin ruutujen keskiarvoina ennen ja jälkeen kokeen ($n = 4$).

| Käsittely | Fosfori ennen koetta (mg P l ⁻¹) | Fosfori kokeen jälkeen (mg P l ⁻¹) |
|-------------------------------|---|---|
| 0 kg P ha ⁻¹ | 5,7 ± 0,8 | 6,1 ± 0,2 |
| 20 kg P ha ⁻¹ | 6,0 ± 0,5 | 6,4 ± 0,6 |
| 20 + 10 kg P ha ⁻¹ | 6,0 ± 0,5 | 6,4 ± 0,5 |
| 51 kg P ha ⁻¹ | 5,5 ± 0,8 | 6,3 ± 0,9 |
| 100 kg P ha ⁻¹ | 5,9 ± 0,4 | 7,1 ± 0,5 |
| <i>p</i> | e.m. | e.m. |

e.m. = ei merkitsevä ($p > 0,05$)

Agronominen tehokkuus (AE) ja lannoitefosforin hyödynnystehokkuus (ARE) eivät kasvaneet kummassakaan kokeessa fosforin lisäyksen myötä, vaan tulokset vaihtelivat satunnaisesti (taulukko 15). Koska sato tai fosforin otto olivat joissain lannoitekäsittelyissä pienempiä kuin lannoittamattomassa käsittelyssä, osa luvuista oli negatiivisia.

Taulukko 15. Agronominen tehokkuus (AE) ja lannoitefosforin hyödynnystehokkuus (ARE) korkean ja välttävän P-viljavuusluokan kokeissa. Luvut on laskettu kunkin käsittelyn ruutujen keskiarvoista.

| Koe | Käsittely | AE | ARE |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------|
| Korkean P-viljavuusluokan koe | 5 kg P ha ⁻¹ | neg. | neg. |
| | 15 kg P ha ⁻¹ | 162 kg kg ⁻¹ | neg. |
| | 32 kg P ha ⁻¹ | neg. | 1,0 % |
| Välttävän P-viljavuusluokan koe | 20 kg P ha ⁻¹ | 52 kg kg ⁻¹ | neg. |
| | 20 + 10 kg P ha ⁻¹ | 109 kg kg ⁻¹ | neg. |
| | 51 kg P ha ⁻¹ | 47 kg kg ⁻¹ | 0,6 % |
| | 100 kg P ha ⁻¹ | neg. | 0,8 % |

neg. = negatiivinen luku

7 TULOSTEN TARKASTELU

7.1 Sato ja peltotase

Toisin kuin oletettiin, fosforilannoitus ei vaikuttanut keräkaalin sadon määrään edes maan fosforipitoisuuden ollessa verrattain vähäinen. Tulos on hyvin mielenkiintoinen, sillä se antaa viitteitä siitä, että nykyisiä kaalin fosforilannoitussuosituksia voitaisiin alen-
taa. Satotaso vastasi aiemmin kenttäkokeissa saatuja tuloksia. Esimerkiksi Suojala ym. (2001) saivat talvikaalilla vastaavaan sadonkorjuu-aikaan satoa 60-90 t ha⁻¹. Käytännön viljelyssä sato on yleensä hieman pienempi kuin kenttäkokeissa. Vihannesten ja marja-
kasvien tasapainoinen N- ja P-lannoitus ja ravinnepestöjen vähentäminen –hankkeen kaikkien keräkaalikokeiden keskisato lannoittamattomissa koejäsenissä oli 68 tn ha⁻¹ ja fosforilisäyksillä saatiin 7 %:n sadonlisä (Suojala-Ahlfors ym. 2017).

Tämän tutkimuksen tulosten perusteella koepeltojen maaperässä oli riittävästi fosforia kasvien saatavilla ja kasvua rajoitti jokin muu tekijä kuin fosforin saanti. Fosforilannoitus ei vaikuttanut satoon Piikkiön peltolohkoilla myöskään hankkeen muina koevuosina (Suojala-Ahlfors ym. 2017). Hankkeen keräkaalikokeista ainoastaan Mikkelin välttävän P-viljavuusluokan maalla tehdyssä kokeessa saatiin satovaste fosforilannoitukselle. Myös Mikkelin kokeen tulosten perusteella keräkaalille riittää verrattain pieni fosfori-
lannoitusmäärä. Suhteellisesta sadonlisästä 95 % saatiin lannoitustasolla 20 kg P ha⁻¹ ja

viljelijälle taloudellisesti kannattavaksi fosforilannoitusmääräksi laskettiin korkeintaan 35-40 kg P ha⁻¹ (Suojala-Ahlfors ym. 2017).

Muilla kasvilajeilla fosforilannoituksella on saatu satovastetta vain pelloilla, joiden fosforitila alittaa tietyn rajan. Eri kasvilajeja käsittävissä koosteanalyyseissä Saarela ym. (2006a, 2006b) havaitsivat, että fosforilannoituksella saatiin merkittäviä satovasteita useimmilla kasvilajeilla vain maan fosforipitoisuuden ollessa hienojakoisilla mailla pieni ja karkeilla mailla pieni tai keskimääräinen, kun maan pH oli kasveille sopiva. He päättelivät, että hienojakoisilla mailla sadon mukana poistuvan ja maahan sitoutuvan fosforin korvaaminen lannoituksella riittää hyvän sadon saamiseksi. Sen sijaan karkeat maalajit vaativat suurempaa lannoitusta, koska niissä fosfori on kasveille huonosti saatavilla.

Valkaman ym. (2011, 2015) kokeiden koosteanalyyseissä fosforilannoitus antoi sadonlisää maalajista riippumatta vain satunnaisesti, kun maan P-viljavuusluokka oli viljoilla vähintään tyydyttävä ja nurmilla vähintään hyvä. Heidänkin mukaansa suurimmalla osalla Suomen pelloista fosforilannoitusta voitaisiin huomattavasti vähentää ja sen sijaan tulisi keskittyä muihin kasvutekijöihin. Tämän tutkielman kaalikokeissa satovastetta ei saatu edes maan P-viljavuusluokan ollessa välttävä tai maalajin karkea. Satovasteita saatettaisiin saada alemman P-viljavuusluokan mailla.

Muiden maiden tutkimuksiin vertailu on vaikeaa erilaisista maan fosforipitoisuuden määrittämenetelmistä johtuen. Norjassa vuosina 2008-2013 tehdyissä laajoissa vihannesten fosforilannoituskokeissa Riley ym. (2012 ref. Suojala-Ahlfors ym. 2017) saivat ke-
räkaalilla 5-7 % sadonlisän lannoitustasoilla 30 ja 60 kg P ha⁻¹ ja päätyivät kaalin laajan juuriston ja hyvän fosforinoton takia suosittelemaan enimmillään 30 kg P ha⁻¹ lannoitusta. Stubhaug ym. (2015 ref. Suojala-Ahlfors ym. 2017) eivät havainneet Norjassa parsakaalikokeissaan satovastetta fosforille ja suosittelivat parsa- ja kukkakaalille 30 kg P ha⁻¹ maan fosforipitoisuuden ollessa luokassa ”optimi”. Cutcliffen ja Munron (1976) tutkimuksessa Kanadassa kukkakaalin enimmäissato saavutettiin fosforilannoitustasolla 49-98 kg P ha⁻¹, kun maan fosforipitoisuus oli Brayn menetelmällä mitattuna 23-86 ppm. Elahin ym. (2015) saivat Pakistanissa kukkakaalin parhaan sadon maksimilannoituksellaan 80 kg P ha⁻¹ hiesumaan fosforipitoisuuden ollessa 3,38 mg kg⁻¹ (mittausmenetelmää

ei ilmoitettu). Pak choilla (*Brassica rapa* Chinensis-Ryhmä) Etelä-Afrikassa tehdyissä kokeissa satotaso ei noussut yli 37,5 kg P ha⁻¹ lannoitusmäärillä maan fosforitilan ollessa Brayn menetelmällä 2 mg kg⁻¹ (Averbeke ym. 2007).

Tämän tutkielman kokeiden fosforipitoisuudet olivat hankkeen muita kokeita suurempia, sillä muissa kokeissa fosforipitoisuus oli koepaikasta, käsittelystä ja vuodesta riippuen kerissä 2,23-3,64 g kg⁻¹ kuiva-ainetta ja ulkolehdissä 1,66-2,78 g kg⁻¹ kuiva-ainetta (Uusitalo ym. 2018). Osassa hankkeen muista keräkaalikokeista fosforilannoitus vaikutti tilastollisesti merkitsevästi kaalin kerien ja ulkolehtien fosforipitoisuuksiin joissakin käsittelyissä, mutta pitoisuudet vaihtelivat huomattavasti eri vuosina, joten muilla kasvutekijöillä kuten säällä arveltiin olevan suurempi merkitys kuin lannoitetasolla (Suojala-Ahlfors ym. 2017).

Korkean P-viljavuusluokan kokeessa fosforin peltotaseet olivat vuonna 2016 hankkeen muita vuosia pienempiä. Fosforitase oli kokeessa alijäämäinen myös korkeimmalla lannoitustasolla 32 kg P ha⁻¹, kun muina vuosina tase oli korkeimmalla lannoitustasolla ylijäämäinen. Tämä johtui luultavasti poikkeuksellisen suuresta sadosta, jonka mukana pellolta poistui paljon fosforia (Suojala-Ahlfors ym. 2017). Välttävän P-viljavuusluokan maissa peltotase oli hankkeen muissa kokeissa ylijäämäinen lannoitustasosta 20, 30 tai 50 kg P ha⁻¹ alkaen (Suojala-Ahlfors ym. 2017).

Jos korkean P-viljavuusluokan koepeltoa olisi lannoitettu ympäristökorvausjärjestelmän salliman enimmäismäärän mukaan, fosforitase olisi tässä kokeessa ollut keskimäärin 5 kg P ha⁻¹ alijäämäinen. Välttävän P-viljavuusluokan maalla ympäristökorvausjärjestelmän sallima lannoitusmäärä on huomattavasti enemmän kuin tämän tutkimuksen perusteella tarvittaisiin, sillä sallitulla lannoitusmäärällä 80 kg P ha⁻¹ fosforitase olisi ollut 54 kg P ha⁻¹ ylijäämäinen.

Suomessa keräkaalin fosforilannoitussuositukset ovat selvästi suurempia kuin monissa muissa Euroopan maissa (Marmolin ja Björkholm 2014). Suomessa tyydyttävän P-viljavuusluokan maalla ympäristökorvausjärjestelmän maksimirajan mukainen suositus on

60 kg P ha⁻¹, kun muissa Pohjoismaissa vastaaventyypisen viljavuuden mailla suositellaan 25-40 kg P ha⁻¹, Saksassa 26 kg P ha⁻¹ ja Iso-Britanniassa 22 kg P ha⁻¹ (Suojala-Ahlfors ym. 2017). Norjassa vihannesten fosforilannoitusrajoja laskettiin huomattavasti vuonna 2012, kun satovasteiden havaittiin tutkimuksissa olevan oletettuja alhaisempia (Riley ym. 2012, ref. Suojala-Ahlfors ym. 2017).

Kokeiden tulosten erot saattoivat johtua paitsi maiden erilaisista fosforitiloista, myös maalajeista ja koealueiden sijainnista. Hienojakoinen savi pidättää enemmän vettä ja ravinteita kuin karkea hietä. Myös maan mikrobisto on voinut olla erilainen. Maan fosforipitoisuuden tai maalajin vaikutuksia satoon ei voida päätellä pelkästään näiden kahden kokeen perusteella.

7.2 Maaperä ja juuristo

Uusitalo ym. (2018) määrittivät hankkeen kokeiden maa-aineksen fosforipitoisuuden helppoliukoisen fosforin määrittävän ammoniumasetaattiuuton lisäksi sitoutuneen reservifosforin määrää mittaavilla P-Olsen- ja P-M3-menetelmillä. Piikkiön korkean ja välttävän P-viljavuusluokan kokeiden P-M3-arvoissa (164 mg l⁻¹ ja 29 mg l⁻¹) oli selkeä ero, kuten ammoniumasetaattiuutonkin tuloksissa, mutta P-Olsen-arvot olivat keskenään samankaltaiset (33 ja 32 mg kg⁻¹). Samaan hankkeeseen kuuluneessa Mikkelin-kokeessa todettiin eri uuttomenetelmien perusteella maassa olleen vähän liukoista fosforia mutta paljon sitoutunutta reservifosforia ja tutkijat päättelivät tämän johtuneen maan suuresta alumiinipitoisuudesta ja siten korkeasta fosforinpidätyskyvystä. He totesivat tulosten viittaavan siihen, että ympäristökorvauksen maksimirajat ovat tarpeettoman suuria ja niistä seuraa ajan myötä peltotaseiden nousu ja fosforin kertyminen maahan.

Välttävän P-viljavuusluokan kokeen maan pH oli matalampi kuin keräkaalille suositellaan. Riittävän korkea pH parantaa fosforin saatavuutta kasveille, mutta kaalin tuottavuuden on todettu alkavan heikentyä vasta pH:n ollessa alle 5,4 (Mengel ja Kirkby 2001,

Dixon ja Dickson 2007). Saarelan ym. (2006a, 2006b) tutkimuksissa pH vaikutti satovasteeseen vain karkeilla mailla. Pellon kalkitseminen ei siis luultavasti vaikuttanut tuloksiin tässä savimaalla tehdyssä kokeessa.

Schneiderin (2019) mukaan maan orgaanisen aineksen pitoisuuden vaikutusta fosforin saatavuuteen kasveille ei usein oteta huomioon fosforilannoitus-suosituksissa. Tässä tutkimuksessa käytetyssä viljavuustutkimuksessa orgaanisen aineksen vaikutus on kuitenkin huomioitu, sillä Eurofins Viljavuuspalvelu Oy:n käyttämä P-viljavuusluokitus perustuu helppoliukoisen fosforin pitoisuuden ja maalajin ohella maan multavuuteen (Eurofins Agro 2019a).

Monien kasvien fosforin ottoa parantaa sienijuuri (Bolan 1991). Kaali ei kuitenkaan kuulu kasveihin, jotka muodostavat sienijuuren (Harley ja Harley 1987). Joillakin kasveilla on sienijuuren sijasta erikoistuneita juurirakenteita, juurirykelmiä, jotka tehostavat huomattavasti fosforin ottoa, mutta ristikkukaskasvien heimossa ei esiinny niitäkään (Lambers ym. 2006).

Kaalin juuriston syvyys ja laajuus tehostaa ravinteiden ottoa, mutta se ei yksinään selitä kaalin suurta fosforin ottoa. Dechassan ym. (2003) kasvihuonekokeissa kaali nimittäin tuotti 80 % maksimisadostaan ilman fosforilannoitusta, kun porkkanalla ja perunalla sato jäi vastaavassa käsittelyssä vähäiseksi, vaikka sekä kaalin että perunan juuristot olivat suuret. Ero ei selittynyt juurten tutkituilla ominaisuuksilla, joita olivat muun muassa juurten pituus ja paksuus, juurikarvojen pituus ja tiheys, juuri-verso-suhde ja fosforin ottovauhti, vaan tutkijat arvelivat fosforin oton tehokkuuden johtuvan juurten erittämistä orgaanisista hapoista.

Monien kasvilajien on todettu tuottavan fosforin ottoa parantavia juurieritteitä (Bolan 1991). Yksi yleisimmistä on hapan fosfataasi, entsyymi joka hydrolysoi ritsosfaarin orgaanisia fosfaattiyhdisteitä kasveille käyttökelpoisiksi ortofosfaateiksi (Nannipieri ym. 2011). Kaalin juurien tuottaman happaman fosfataasin aktiivisuuden on todettu olevan monia muita lajeja suurempaa, kun fosforia on niukasti tarjolla (Tadano ja Sakai 1991).

Fosfaattia maahiukkasista irrottavat juurieritteet saattavat hyvinkin selittää tämän tutkimuksen tuloksia.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksella tuotettiin arvokasta uutta tietoa keräkaalin fosforilannoituksesta. Kasvin tarvetta vastaavan lannoitustason löytäminen on tärkeää, sillä liiallinen lannoitus lisää ympäristöriskejä. Lisäksi lannoitustason nostaminen tulee tietyn tason jälkeen kalliimmaksi kuin sadonlisästä saatu lisätulo, jolloin se ei ole viljelijälle taloudellisesti kannattavaa. Jos maan fosforitila on lähtökohtaisesti riittävä, ei kasvien tarvetta suurempi lannoitus ole perusteltua.

Tämän tutkielman perusteella vaikuttaa siltä, että on mahdollista saada hyvä kaalisato verrattain vähäisellä fosforilannoituksella ja nykyisiä suosituksia voitaisiin pienentää. Lannoitusta suunniteltaessa olisi syytä huomioida maan fosforivarannot ja korkeintaan korvata maasta sadon mukana poistunut fosfori. Jos maan fosforipitoisuus on korkea, alijäämäinenkin peltotase voi olla hyväksyttävä, sillä se ei heikennä satoa vaan ainoastaan johtaa pitkään jatkuneena pellon fosforivarantojen vähittäiseen pienenemiseen.

Keräkaalin fosforilannoituksesta tarvitaan lisää tutkimusta erilaisten fosforipitoisuuksien ja maalajien mailta johtopäätösten luotettavuuden lisäämiseksi ja jotta voidaan määrittää vahvasti tieteelliseen tutkimukseen perustuvat lannoitussuosituksien ja -rajat. On mahdollista ylläpitää hyvä satotase huomioiden samalla tuotannon ekologiset vaikutukset.

9 KIITOKSET

Kiitän Luonnonvarakeskusta sekä tutkimushankkeen rahoittajia Maatilatalouden kehittämisrahasto Makeraa ja Yara Suomi Oy:tä mahdollisuudesta osallistua tutkimustyöhön harjoittelijana ja kerätä aineisto tätä maisterintutkielmaa varten. Kiitän myös Luonnonvarakeskus Piikkiön henkilökuntaa – kanssanne oli ilo työskennellä ja opin teiltä paljon.

Lämpimät kiitokset Luonnonvarakeskuksen vihannesviljelyn tutkija, maatalous- ja metsätieteiden tohtori Terhi Suojala-Ahlforsille erinomaisesta ohjauksesta. Kiitos myös Maataloustieteiden laitoksen ohjaajalleni dosentti Pauliina Paloselle työn kommentoinista sen eri vaiheissa. Kiitos opponentilleni Markus Laurelille ja kaikille työssä autta-neille ja tukeneille asiantuntijoille, kanssaopiskelijoille ja ystäville. Lopuksi vielä kiitos puolisollleni Opalle tuesta ja kannustuksesta sekä tutkielman teon aikana syntyneelle Aarnille, joka antoi kirjoitustyölle arvokasta vastapainoa.

LÄHTEET

- Aakkula, J., Manninen, T. & Nurro, M. (toim.) 2010. Maatalouden ympäristötuen vaikuttavuuden seurantatutkimus (MYTVAS 3) - Väliraportti. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 1. Helsinki: Vammalan Kirjapaino Oy. 147 s.
- Aaltonen, M. 2000. Kaalin viljely. Helsinki: Puutarhaliitto. 115 s.
- Averbeke, W. van, Juma, K. A. & Tshikalange, T. E. 2007 Yield response of African leafy vegetables to nitrogen, phosphorus and potassium: The case of *Brassica rapa* L. subsp. *chinensis* and *Solanum retroflexum* Dun. Water SA 33: 355-362.
- Baligar, V. C. & Fageria, N. K. 2015. Nutrient use efficiency in plants: an overview. Teoksessa: Rakshit, A., Singh, H. B. & Sen, A. (toim.). Nutrient use efficiency: from basics to advances. New Delhi, India: Springer. s. 1-14.
- Baltic Marine Environment Protection Commission 2013. Taking further action to implement the Baltic sea action plan - Reaching good environmental status for a healthy Baltic sea. (HELCOM Copenhagen ministerial declaration, 3.10.2013, Köö-

- penhamina, Tanska). Sähköinen julkaisu, 19 s. <http://www.helcom.fi/Documents/Ministerial2013/Ministerial%20declaration/2013%20Copenhagen%20Ministerial%20Declaration%20w%20cover.pdf>. Tulostettu 22.10.2019.
- Bolan, N. S. 1991. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant and Soil* 134: 189-207.
- Bünemann, E. K. 2015. Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus - a review. *Soil Biology and Biochemistry* 89: 82-98.
- Bünemann, E. K., Oberson, A., Liebisch, F., Keller, F., Annaheim, K. E., Huguenin-Elie, O. & Frossard, E. 2012. Rapid microbial phosphorus immobilization dominates gross phosphorus fluxes in a grassland soil with low inorganic phosphorus availability. *Soil Biology and Biochemistry* 51: 84-95.
- Cordell, D. & White, S. 2011. Peak phosphorus: Clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security. *Sustainability* 3: 2027-2049.
- Cutcliffe, J. A. & Munro, D. C. 1976. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium on yield and maturity of cauliflower. *Canadian Journal of Plant Science* 56: 127-131.
- Dechassa, N., Schenk, M., K., Claassen, N. & Steingrobe, B. 2003. Phosphorus efficiency of cabbage (*Brassica oleraceae* L. var. *capitata*), carrot (*Daucus carota* L.), and potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant and Soil* 250: 215-224.
- Dixon, G. R. & Dickson, M. H. 2007. Vegetable Brassicas and related crucifers. *Crop Production Science in Horticulture* 14. Wallingford, Iso-Britannia: CABI. 327 s.
- Ehlert, P., Morel, C., Fotyma, M. & Destain, J.-P. 2003. Potential role of phosphate buffering capacity of soils in fertilizer management strategies fitted to environmental goals. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166: 409-415.
- Elahi, E., Wali, A., Nasrullah, Ayub, G., Ahmed, S., Huma, Z. & Ahmed, N. Response of cauliflower (*Brassica oleracea* L. *botrytis*) cultivars to phosphorus levels. *Pure and Applied Biology* 4: 187-194.
- Eurofins Agro 2019a. Viljavuustutkimuksen tulkinta. https://cdnmedia.eurofins.com/european-east/media/2849228/viljavuustutkimuksentulkinta_01022019.pdf. Tulostettu 22.10.2019.
- Eurofins Agro 2019b. Viljavuustilastot. <https://www.tuloslaari.fi/index.php?id=41>. Viitattu 22.10.2019.

- Fredeen, A. L., Rao, M. & Terry, N. 1989. Influence of phosphorus nutrition on growth and carbon partitioning in *Glycine max*. Plant Physiology 89: 225-230.
- Grönroos, J., Hietala-Koivu, R., Kuussaari, M., Laitinen, P., Lankoski, J., Lemola, R., Miettinen, A., Perälä, P., Puustinen, M., Schulman, A., Salo, T., Siimes, K. & Turtola, E. 2007. Analyysi maatalouden ympäristötukijärjestelmästä 2000-2006. Suomen ympäristö 19. Helsinki: Edita Prima Oy. 169 s.
- Hannukkala, A., Heikkinen, J. & Salo, T. 2014. Perunan, porkkanan ja sokerijuurikkaan viljelykiertojen vaikutukset kasvintuhoojiin ja ravinnetaseisiin. TEHO Plus -hankkeen julkaisu 7/2014. Sähköinen julkaisu, 44 s. <https://www.doria.fi/handle/10024/102394>. Julkaistu 2014. Tulostettu 22.10.2019.
- Harley, J. L. & Harley, E. L. 1987. A check-list of mycorrhiza in the British flora. New Phytologist 105: 1-102.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring J., Skrumsager Møller, I. & White, P. (toim.) 2012. Functions of macronutrients. Teoksessa: Marschner, P. (toim.). Mineral nutrition of higher plants. 3. painos. Lontoo, Iso-Britannia: Academic Press Harcourt Brace & Company. s. 135-189.
- Ilmatieteen laitos 2016. Ilmatieteen laitoksen havaintoasemat. <http://ilmatieteenlaitos.fi/havaintoasemat>. Viitattu 14.11.2016.
- Jasinski, S. M. 2019: Phosphate rock. Teoksessa: U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2019. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. s. 122-123.
- Jeschke, W. D., Kirkby, E. A., Peuke, A. D., Pate, J. S. & Hartung, W. 1997. Effects of P deficiency on assimilation and transport of nitrate and phosphate in intact plants of castor bean (*Ricinus communis* L.). Journal of Experimental Botany 48: 75-91.
- Kirkkala, T., Helminen, H. & Erkkilä, A. 1998. Variability of nutrient limitation in the Archipelago Sea, SW Finland. Hydrobiologia 363: 117-126.
- Lambers, H., Shane, M. W., Cramer, M. D., Pearse, S. T. & Veneklaas, E. J. 2006. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: Matching morphological and physiological traits. Annals of Botany 98: 693-713.
- Lemola, R., Uusitalo, R., Hyväluoma, J., Sarvi, M. & Turtola, E. 2018. Suomen peltojen maalajit, multavuus ja fosforipitoisuus - Vuodet 1996-2000 ja 2005-2009. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 17/2018. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 210 s.

- Littoistenjärven osakaskuntien hoitokunta 2017. Littoistenjärven kunnostuskäsittelyn lopetustiedote. http://www.littoistenjarvi.fi/wp-content/uploads/2013/06/ENV1107_Lopetustiedote_Littoistenj%C3%A4rvi_kunnostus_3.8.2017.pdf. Julkaistu 3.8.2017, tulostettu 3.10.2017.
- Luken tilastopalvelut 2019a. Typpi- ja fosforitaseen (kg/ha) kehitys ELY-keskuksittain. Luonnonvarakeskuksen tilastotietokanta. http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_08%20Indikaattorit_06%20Ymp%C3%A4rist%C3%B6_12%20Typpi-%20ja%20fosforitase/01_Typpi_fosforitase.px/?rxid=a290f7c2-69ab-4cf6-8366-fd5186c09513. Julkaistu 2019, viitattu 22.10.2019.
- Luken tilastopalvelut 2019b. Vihannesviljely avomaalla / kokonaistuotanto. Luonnonvarakeskuksen tilastotietokanta. http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_02%20Maatalous_04%20Tuotanto_20%20Puutarhatilastot/05_Vihannesviljely_avomaa_kokonaistuotanto.px/?rxid=78a46f11-9433-4843-8e1b-d4a1c2aab150. Julkaistu 2019, viitattu 22.10.2019.
- Maaseutuvirasto 2015. Ympäristökorvauksen sitoumusehdot 2015. Sähköinen julkaisu, 73 s. <https://ruokavirasto.mobiezone.fi/zine/82/pdf>. Tulostettu 22.10.2019.
- Marmolin, C. & Björkholm, A. 2014. Växtnäringsrekommendationer till frilandsgrönsaker. Hushållningssällskapet, Rapport TT65. 37 s.
- Marschner, H., Kirkby, E. A. & Engels, C. 1997. Importance of cycling and recycling of mineral nutrients within plants for growth and development. *Botanica Acta* 110: 265-273.
- Mengel, K. & Kirkby, E. A. 2001. Principles of plant nutrition. 5. painos. Dordrecht, Alankomaat: Kluwer Academic Publishers. 849 s.
- Nannipieri, P., Giagnoni, L., Landi, L. & Renella, G. 2011. Role of phosphatase enzymes in soil. Teoksessa: Bünemann, E. K., Oberson, A. & Frossard, E. (toim.). Phosphorus in action: Biological processes in soil phosphorus cycling. *Soil Biology* 26 (elektroninen aineisto). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, s. 215-243.
- Nissinen, A. 2012. Kaali, lanttu, nauris ja muut ristikukkaiset: Tuhoeläimet. Teoksessa: Ahvenniemi, P. (toim.). Ajankohtaisia kasvinsuojeluohjeita. Kasvinsuojeluseura

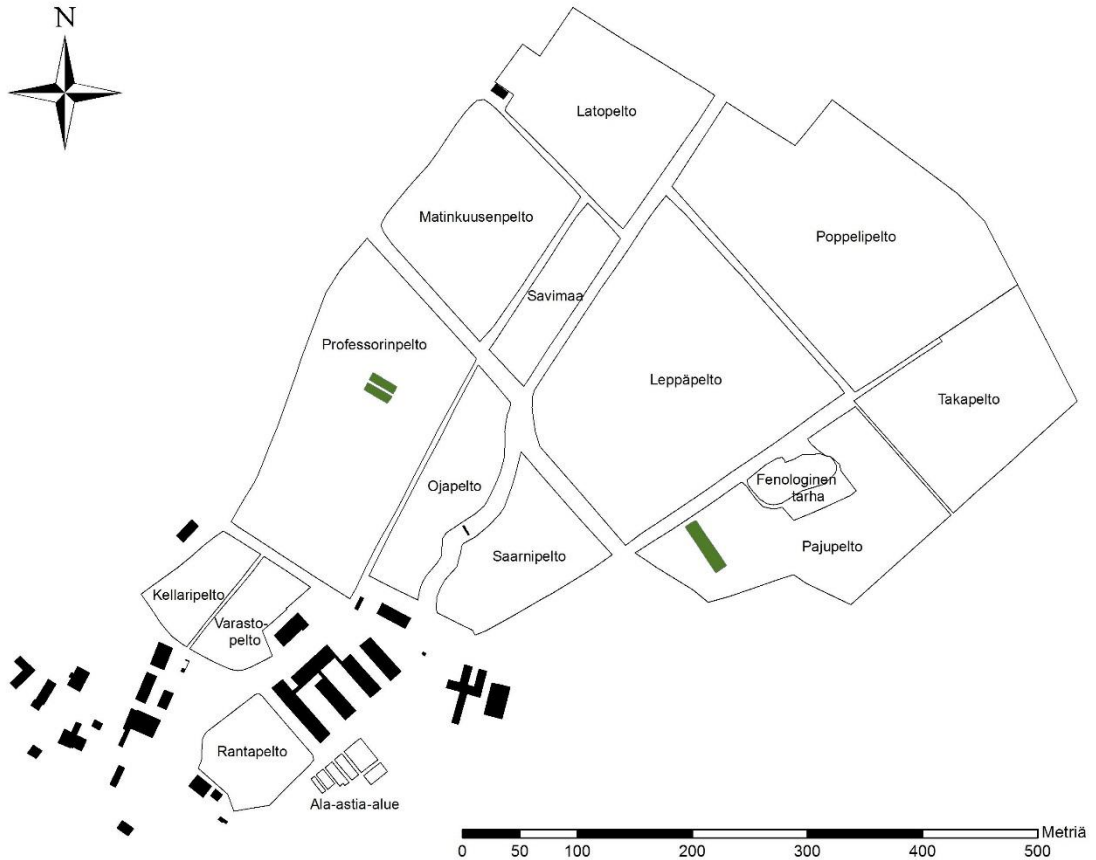
- ry:n julkaisuja n:o 103. 15. uudistettu painos. Hämeenlinna: Kariston Kirjapaino Oy. s. 198-204.
- Parikka, P. 2012. Kaali, lanttu, nauris ja muut ristikukkaiset: Kasvitaudit. Teoksessa: Ahvenniemi, P. (toim.). Ajankohtaisia kasvinsuojeluohjeita. Kasvinsuojeluseura ry:n julkaisuja n:o 103. 15. uudistettu painos. Hämeenlinna: Kariston Kirjapaino Oy, s. 197-198.
- Puutarhaliike Helle Oy 2019. Lennox F1. Tukkumyyntiliikkeen www-sivu. <http://www.helle.fi/product/566/lennox-f1>. Viitattu 24.9.2019.
- Riley, H., Stubhaug, E., Kristoffersen, A. Ø, Krogstad, T., Guren, G. & Tajet, T. 2012. P-gjødsling til grønnsaker: Evaluering og nye anbefalinger. Bioforsk rapport vol. 7 nr. 68. Sähköinen julkaisu, 44 s. <http://hdl.handle.net/11250/2487667>. Tulostettu 22.10.2019.
- Ruokavirasto 2019. Ympäristökorvauksen sitoumusehdot 2015 – Sisältää 2015-2019 muutokset. Sähköinen julkaisu. <https://ruokavirasto.mobiezone.fi/zine/553/cover>. Julkaistu 2019, viitattu 22.10.2019.
- Saarela, I., Huhta, H. & Virkajärvi, P. 2006a. Effects of repeated phosphorus fertilisation on field crops in Finland - 2. Sufficient phosphorus application rates on silty and sandy soils. *Agricultural and Food Science* 15: 423-443.
- Saarela, I., Salo, Y. & Vuorinen, M. 2006b. Effects of repeated phosphorus fertilisation on field crops in Finland - 1. Yield responses on clay and loam soils in relation to soil test P values. *Agricultural and Food Science* 15: 106-123.
- Salo, T. 2003. Ravinnetaseet ja typen vapautuminen viljelykierron aikana. Teoksessa: Nissinen, A., Vanhala, P. (toim.), Salo, T., Lötjönen, T., Outa, P. & Piirainen, A. Luomuvihannesten viljelykiertojen hallinta – Onko viljelykiertosi nousukierre vai syökierre? MTT:n selvityksiä 47. Sähköinen julkaisu, 39 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-729-809-9>. Tulostettu 22.10.2019.
- Schneider, K. D., Thiessen Martens, J. R., Zvomuya, F., Reid, D. K., Fraser, T. D., Lynch, D. H., O'Halloran, I. P. & Wilson, H. F. 2019. Options for improved phosphorus cycling and use in agriculture at the field and regional scales. *Journal of Environmental Quality* 48: 1247-1264.

- Schröder, J. J., Smit, A. L., Cordell, D. & Rosemarin, A. 2011. Improved phosphorus use efficiency in agriculture: A key requirement for its sustainable use. *Chemosphere* 84: 822-831.
- Smil, V. 2000. Phosphorus in the environment: Natural flows and human interferences. *Annual Review of Energy and the Environment* 25: 53-88.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B. & Sörlin, S. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347 (6223): 736-747.
- Stubhaug, E., Riley H. & Kristoferssen A.Ø. 2015. P-gjødsling til brokkoli, blomkål, kålrot og isbergsalat. Nye anbefalinger. Bioforsk Rapport vol. 10 nr. 14.
- Suojala, T., Salo, T., Kallela, M., Pulkkinen, J. & Kaukoranta, T. 2001. Keräkaalin, sipulin ja porkkanan kastelu ja lannoitus. Teoksessa: Tahvonen, R., Suojala, T. & Sironen, L. (toim.). Kasvukauden oloihin sopeutuva puutarhaviljely. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja, sarja A 91. Jyväskylä: Jyväskylän yliopistopaino. 81 s.
- Suojala-Ahlfors, T., Uusitalo, R., Kivijärvi, P. & Hurme, T. 2017. Vihannesten fosforilannoitustutkimus. Teoksessa: Suojala-Ahlfors, T. (toim.). Vihannesten ja mansikan tasapainoinen fosfori- ja typpilannoitus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 44. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 84 s.
- Tadano, T. & Sakai, H. 1991. Secretion of acid phosphatase by the roots of several crop species under phosphorus-deficient conditions. *Soil Science and Plant Nutrition* 37: 129-140.
- Tuomola, J., Avikainen, H., Iivonen, S., Kivijärvi, P., Li, H., Piirainen, A. & Pirhonen, M. 2012. Vihannesviljelyn taloudellisen kannattavuuden kehittäminen tautien ja lannoituksen hallinnalla. Helsingin yliopisto, Ruralia-instituutti, Raportteja 80. Sähköinen julkaisu, 45 s. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/225811/Raportteja80.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Tulostettu 22.10.2019.
- Turtola, E. & Lemola, R. (toim.) 2008. Maatalouden ympäristötuen vaikutukset vesistökuormitukseen, satoon ja viljelyn talouteen v. 2000-2006 (MYTVAS 2). Jokioinen: Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. 103 s.

- Uusitalo, R., Ekholm, P., Turtola, E., Pitkänen, H., Lehtonen, H., Granlund, K., Bäck, S., Puustinen, M., Räike, A., Lehtoranta, J., Rekolainen, S., Walls, M. & Kauppila, P. 2007a. Maatalous Itämeren rehevöittäjänä. Maa- ja elintarviketalous 96. Tampere: Tampereen Yliopistopaino – Juvenes Print. 34 s.
- Uusitalo, R., Suojala-Ahlfors, T., Kivijärvi, P. & Hurme, T. 2018. Yield responses to P fertilisation of onion (*Allium cepa* L.) and cabbage (*Brassica oleracea* Capitata Group L.) in Finland. *Agricultural and Food Science* 27: 63-73.
- Uusitalo, R., Turtola, E., Grönroos, J., Kivistö, J., Mäntylähti, V., Turtola, A., Lemola, R. & Salo, T. 2007b. Finnish trends in phosphorus balances and soil test phosphorus. *Agricultural and Food Science* 16: 301-301-316.
- Valkama, E., Uusitalo, R. & Turtola, E. 2011. Yield response models to phosphorus application: a research synthesis of Finnish field trials to optimize fertilizer P use of cereals. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 91: 1-15.
- Valkama, E., Virkajärvi, P., Uusitalo, R., Ylivainio, K. & Turtola, E. 2015. Meta-analysis of grass ley response to phosphorus fertilization in Finland. *Grass and Forage Science* 71: 36-53.
- Voipio, I. 2001. Vihannekset - lajit, viljely, sato. Helsinki: Puutarhaliitto. 351 s.
- Vuorinen, J. & Mäkitie, O. 1955. The method of soil testing in use in Finland. *Agroecological Publications* 63. Helsinki: Valtioneuvoston kirjapaino. 44 s.
- Weih, M., Hamnér, K. & Pourazari, F. 2018. Analyzing plant nutrient uptake and utilization efficiencies: comparison between crops and approaches. *Plant Soil* 430: 7-21.
- Yara Suomi Oy 2019. Lannoiteopas 2019-2020. Sähköinen julkaisu, 80 s.
<http://ebook.aineisto.fi/Yara/Lannoiteopas2019-2020/#p=2>. Tulostettu 22.10.2019.
- Ylivainio, K., Sarvi, M., Lemola, R., Uusitalo, R. & Turtola, E. 2014. Regional P stocks in soil and in animal manure as compared to P requirement of plants in Finland. MTT Report 124. Sähköinen julkaisu, 35 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-505-9>. Tulostettu 22.10.2019.

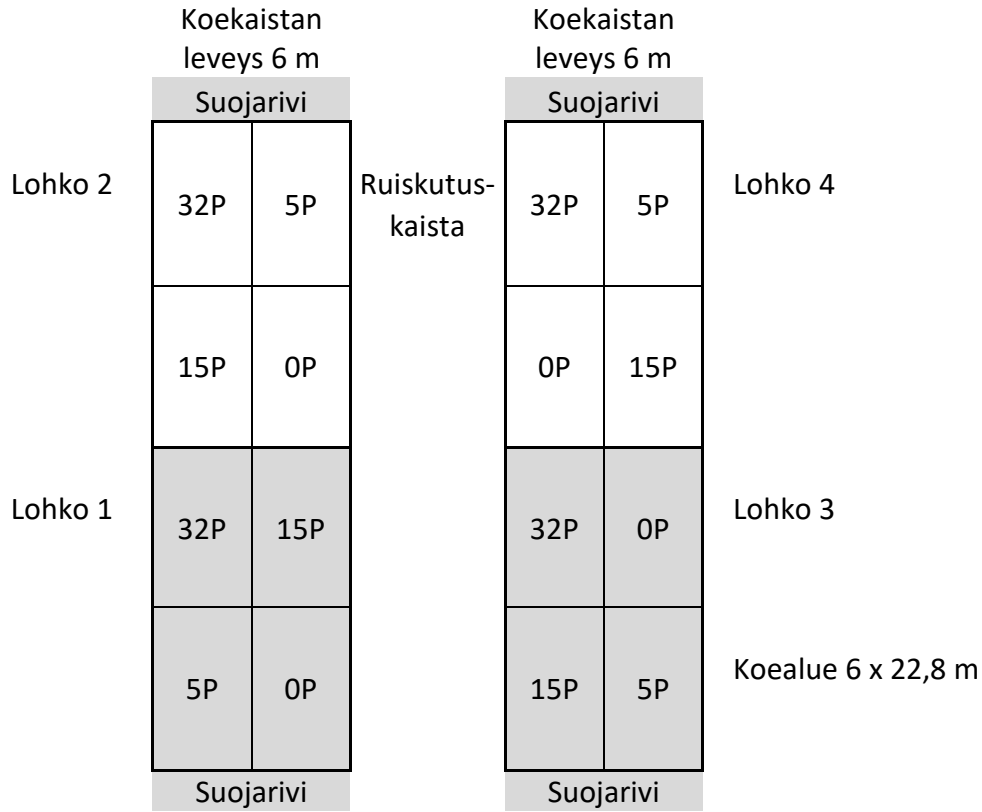
LIITE 1: KOEALUEEN SIJAINTI

Kokeet tehtiin Luonnonvarakeskuksen Piikkiön toimipaikassa, korkean P-viljavuusluokan koe (kaksi kaistaa) Professorinpellolla ja välttävän P-viljavuusluokan koe Pajupellolla. Koealueet on merkitty karttaan vihreällä. Muokattu kuvasta: Mika Raivonen, Luonnonvarakeskus.

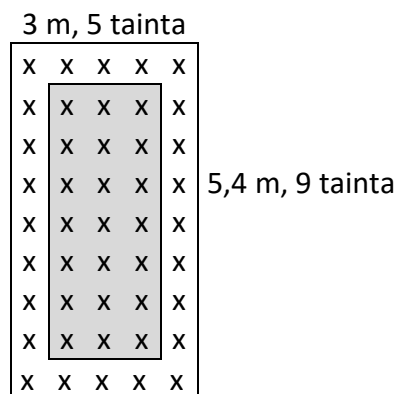


LIITE 2: KORKEAN P-VILJAVUUSLUOKAN KOKEEN KARTTA JA KOERUUTU

Käsittelyt on merkitty seuraavasti: 0P = 0 kg P ha⁻¹, 5P = 5 kg P ha⁻¹, 15P = 15 kg P ha⁻¹ ja 32P = 32 kg P ha⁻¹. Muokattu kuvasta: Terhi Suojala-Ahlfors, Luonnonvarakeskus.



Koeruutu



Koeruudussa 45 tainta,
joista satonäytteeksi
21 keskimmäistä

LIITE 3: VÄLTÄVÄN P-VILJAVUUSLUOKAN KOKEEN KARTTA JA KOERUUTU

Käsittelyt on merkitty seuraavasti: 0P = 0 kg P ha⁻¹, 20P = 20 kg P ha⁻¹, 20 +10P = starttilannoituskäsittely 20+10 kg P ha⁻¹, 51P = 51 kg P ha⁻¹ ja 100P = 100 kg P ha⁻¹. R tarkoittaa Rhizocell-mikrobivalmistekäsittelyä, jota ei käsitellä tässä tutkielmassa. Muokattu kuvasta: Terhi Suojala-Ahlfors, Luonnonvarakeskus.

| | | |
|---------|------------------------|--------|
| | Koealueen leveys 8,4 m | |
| | Suojaarivi | |
| Lohko 4 | 20+10P | 100P |
| | 0P | 51P |
| | 20P | R |
| Lohko 3 | 51P | 0P |
| | R | 20P |
| | 100P | 20+10P |
| Lohko 2 | 51P | 0P |
| | 20+10P | 20P |
| | R | 100P |
| Lohko 1 | R | 20P |
| | 0P | 20+10P |
| | 51P | 100P |
| | Suojaarivi | |

Koealueen pituus 44,4 m

Koeruutu

4,2 m, 7 tainta

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| x | x | x | x | x | x | x |
| x | x | x | x | x | x | x |
| x | x | x | x | x | x | x |
| x | x | x | x | x | x | x |
| x | x | x | x | x | x | x |
| x | x | x | x | x | x | x |
| x | x | x | x | x | x | x |

3,6 m, 6 tainta

Koeruudussa 42 tainta,
joista satonäytteeksi
20 keskimmäistä